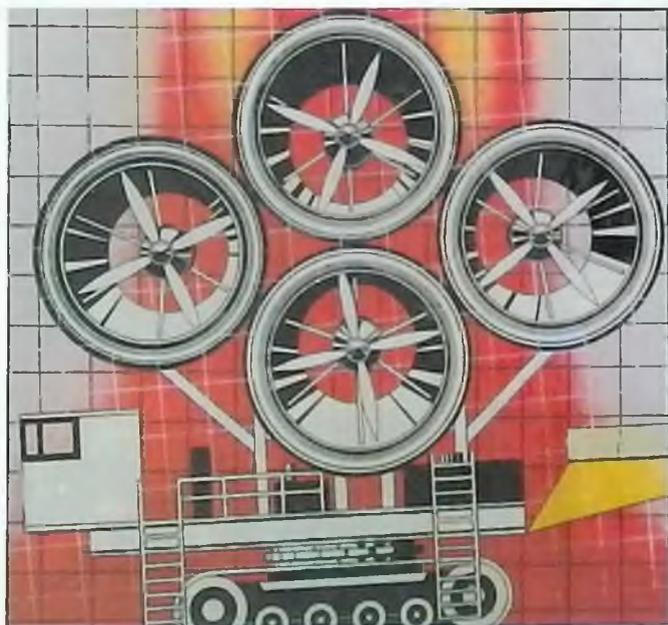
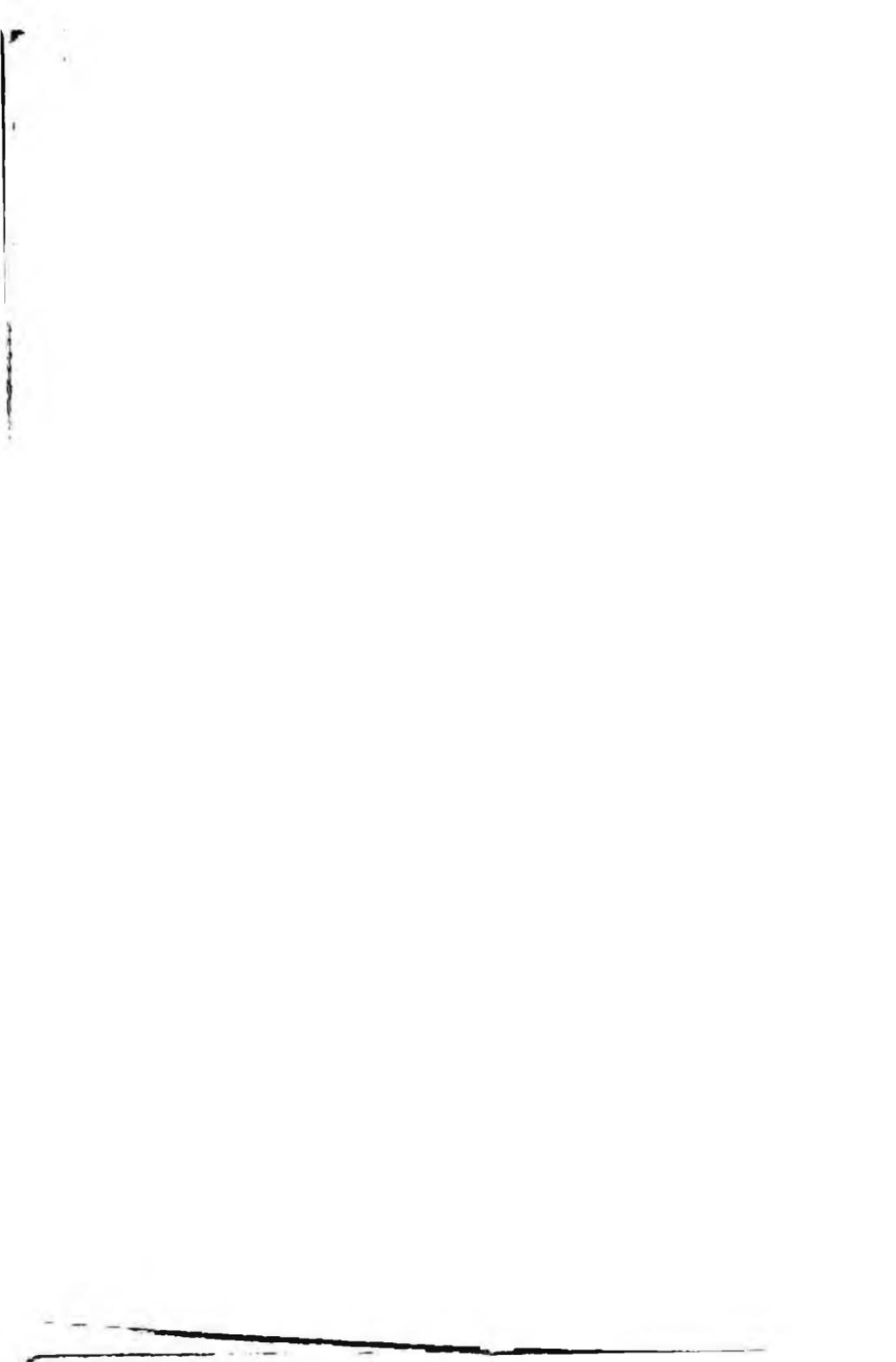


**М. М. КОНОРЕВ
Г. Ф. НЕСТЕРЕНКО**

**ВЕНТИЛЯЦИЯ
И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЕ
В АТМОСФЕРЕ КАРЬЕРОВ**



**ЕКАТЕРИНБУРГ
2000**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

*Олегу Николаевичу
с замечанием автора
М. М. К.*
Ф. Ф. Н.

М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко

ВЕНТИЛЯЦИЯ
И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЕ
В АТМОСФЕРЕ КАРЬЕРОВ

г. Екатеринбург
2000 г.

УДК 622.458

К 64

Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф. Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров.— Екатеринбург: ИГД УрО РАН.— 2000.— 312 с.

Рассмотрены теоретические и практические вопросы нормализации атмосферы карьеров и защиты окружающей среды. Обобщен накопленный опыт разработки и применения средств пылегазоподавления в карьерах. Дан анализ факторов, влияющих на загрязнение атмосферы карьеров. Приведены результаты исследования процессов пылегазоподавления при массовых взрывах, формирования, подъема, рассеивания пылегазового облака и его подавления. Обоснован состав комплекса средств искусственной вентиляции и пылегазоподавления в карьерах.

Для инженерно-технических работников производства, а также специалистов научно-исследовательских и проектных институтов и студентов.

Ответственный редактор — доктор технических наук, профессор Н. О. Каледина, зав. кафедрой аэрологии и охраны труда Московского государственного горного университета.

Рецензент — кандидат технических наук А. И. Павлов (ИГД УрО РАН).

ISBN 5—7691—1092—9

К $\frac{134(00)}{8П6(03)1998}$ ПБ-2000

© Конорев М. М.,
Нестеренко Г. Ф., 2000 г.

Список принятых сокращений

АГТД	— авиационные газотурбинные двигатели;
а/с	— автосамосвал;
АСКА	— автоматическая станция контроля атмосферы;
ВВ	— взрывчатые вещества;
ВГСЧ	— военизированная горно-спасательная часть;
ВМГ	— винтомоторная группа;
ВУ	— вентиляторная установка;
ГБРУ	— Гороблагодатское рудоуправление;
ГОК	— горно-обогатительный комбинат;
ДВС	— двигатель внутреннего сгорания;
ДП	— диспетчерский пункт;
ДТРД	— двухконтурный турбореактивный двигатель;
ЗВЗ	— зона возможного загрязнения;
ИЗВ	— измеритель запыленности воздуха;
ИК	— инфракрасный;
ИТ	— индикаторные трубки;
КНК	— капсульный нейтрализатор каталитический;
КП	— контролируемые пункты;
к. п. д.	— коэффициент полезного действия;
НГМК	— Навойский горно-обогатительный комбинат;
НТМК	— Нижне-Тагильский металлургический комбинат;
ОГ	— отработавшие газы;
ПАВ	— поверхностно-активные вещества;
ПГО	— пылегазовое облако;
ПГХК	— Приаргунский горно-химический комбинат;
ПДК	— предельно допустимая концентрация;
ПО	— производственное объединение;
РК	— рабочее колесо;
РМЗ	— ремонтно-механический завод;

- СА — спрямляющий аппарат;
СИВ — система искусственной вентиляции;
ССГОК — Соколовско-Сарбайский горно-обогатительный комбинат;
ССТОГ — система снижения токсичности отработавших газов;
ТВД — турбовинтовой двигатель;
ТРД — турбореактивный двигатель;
УТВ — устройство телеуправления вентиляторами;
УТКА — устройство телеконтроля атмосферы;
УФ — ультрафиолетовый;
ХСД — химический сенсорный датчик;
ЦГХК — Целлинный горно-химический комбинат;
ЦПТ — циклично-поточная технология;
ЦТТ — цех технологического транспорта;
ЦУ — центральное устройство.
-

ВВЕДЕНИЕ

В развитии горнорудной промышленности прослеживается устойчивая ориентация на открытый способ разработки как наиболее экономичный и высокопроизводительный. За последние 30 лет доля руд черных и цветных металлов, добытых на карьерах, увеличилась, соответственно, с 56 до 86 % и с 40 до 55 %. Аналогичная тенденция наблюдается и в угольной промышленности. Большинство действующих карьеров будет эксплуатироваться и далее. Причем свыше 50 % горной массы будет добываться на карьерах глубиной более 300 м.

При интенсификации и высокой концентрации производства с увеличением глубины происходит загрязнение атмосферы вредными примесями, превышающее ПДК. Запыленность воздуха на рабочих местах достигает 2,7—2,8 мг/м³, оксида углерода 13—24 мг/м³, окислов азота 3,1—5,8 мг/м³. Загрязнение атмосферы вредными примесями, выделяющимися при работе горно-транспортного оборудования, сопровождается ростом травматизма, снижением производительности труда, появлением профессиональных заболеваний и простоями карьеров, достигающими 10—12 % рабочего времени.

Основными причинами загрязнения атмосферы являются несовершенство технологических процессов и оборудования, ухудшение условий естественного воздухообмена с ростом глубины карьеров. При этом основными источниками пылегазовых выбросов являются буровзрывные работы, технологический автотранспорт, комплексы циклично-поточной технологии, экскавация, отвалообразование, вспомогательные технологические операции и оборудование. Существенное влияние на загрязнение атмосферы глубоких карьеров оказывает микроклимат районов их расположения. В наиболее неблагоприятных условиях в этом отношении находятся карьеры Восточной Сибири, Северо-Запада, Урала и Казахстана, где штилевые периоды в сочетании с инверсиями, соответственно, составляют 2720, 1650, 1220, 500 часов в год. По технологическому фактору с учетом изменения геометрии карьеров, увеличения объемов добычи горной массы ухудшение условий естественного воздухообмена будет наблюдаться на Оленегорском, Ковдорском, Сарбайском и других карьерах.

Применение известных локальных средств и мероприятий по подавлению пыли и газа у мест их образования, систем кондиционирования воздуха в кабинах горных машин становится уже не-

достаточным для нормализации атмосферы, в результате чего возникает необходимость прекращения горных работ. Кроме того, с учетом современных требований экологии возникает необходимость не только обеспечения нормальных санитарно-гигиенических условий труда непосредственно в карьере, но и сокращения выбросов вредных примесей за его пределы — предотвращение загрязнения окружающей среды. В этих условиях возрастает роль искусственной вентиляции как технологического процесса на открытых горных работах, обеспечивающего одновременно очистку воздуха, выбрасываемого за пределы карьера.

С ухудшением экологической обстановки на открытых горных работах в конце 50-х — начале 60-х годов интенсивно развивается новая область горной науки — аэрология карьеров, основоположником которой явился академик А. А. Скочинский. Большую роль в решении теоретических и практических вопросов оздоровления условий труда на открытых горных работах сыграли труды члена-корреспондента АН УССР Ф. А. Абрамова, докторов наук Н. З. Битколова, П. В. Бересневича, Л. Д. Вассермана, Г. В. Калабина, К. В. Кочнева, А. А. Кулешова, А. Н. Купина, В. А. Михайлова, В. С. Никитина, В. В. Силаева, В. Н. Сытенкова, К. З. Ушакова, С. С. Филатова, П. Ч. Чулакова, кандидатов наук Я. З. Бухмана, А. А. Вершинина, Ю. В. Гуля, И. И. Иванова, Л. А. Казакова, В. П. Куликова, Н. В. Ненашева, А. И. Павлова, Г. А. Радченко, С. М. Рослякова, О. Г. Страшникова, П. Д. Шилова и многих других. Этими исследованиями определены следующие направления комплексного решения проблемы:

а) совершенствование технологических процессов и горно-транспортного оборудования;

б) интенсификация естественного воздухообмена за счет рационального расположения отвалов горных пород;

в) рекультивация земель, нарушенных открытыми горными работами;

г) внедрение эффективных средств искусственной вентиляции и пылегазоподавления.

Одним из перспективных направлений улучшения условий труда на глубоких карьерах является использование свободных турбулентных струй. Однако при выборе технических средств для общеобменной искусственной вентиляции и гидрообеспыливания атмосферы карьеров среди исследователей нет единства. В качестве генераторов свободных турбулентных струй инсти-

тут Унипромедь рекомендует установки на базе турбореактивного двигателя (ТРД); ВНИИГМ им. М. М. Федорова и НИИ-ОГР предлагают специальный вентилятор ПВУ-6 с электроприводом, а также установку на базе трех турбовинтовых двигателей (ТВД) типа АИ-20; ИГД МЧМ СССР разработан и внедрен ряд карьерных вентиляторов на основе авиационных винтов с электрическим и газотурбинным приводом. Состояние научных исследований, опытно-конструкторских работ и результаты испытаний различных типов вентиляторов на базе авиационных винтов и двигателей позволили перейти от испытаний единичных образцов вентиляторов к созданию систем вентиляции и пылегазоподавления. Книга написана на основании обзора за несколько десятков лет отечественной и зарубежной специальной литературы, собственных многолетних исследований теоретических вопросов, опытно-промышленных испытаний средств пылегазоподавления на ряде крупных карьеров СНГ.

ГЛАВА I

НОРМАЛИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

1.1. Анализ результатов исследований по проблеме нормализации атмосферы карьеров и защиты окружающей среды

На современных карьерах горные работы ведутся на глубине 150—300 м. В перспективе глубина карьеров превысит 500—600 м.

Технологические процессы на карьерах характеризуются интенсивным выделением вредных примесей, загрязняющих как атмосферу карьера, так и окружающую среду. Их и используемое горнотранспортное оборудование карьеров как источники выделения вредных примесей условно можно разделить на 4 группы:

— объемные, при которых вредные вещества выделяются при практически мгновенном воздействии ВВ на большие объемы горных пород (массовые взрывы);

— точечные, при которых вредные вещества выделяются либо с определенной точки, либо с площади с небольшими линейными размерами (буровые станки, экскаваторы, грохотильно-дробильные узлы и др.);

— линейные, при которых вредные вещества выделяются на участке, определяемом значительной величиной одного из линейных размеров (конвейерные подъемники, железнодорожные составы, автопоезда, автодороги и др.);

— площадные, при которых вредные вещества выделяются с площади с большими линейными размерами (внутрикарьерные отвалы, склады, хвостохранилища и др.).

Для борьбы с газами и пылью на отечественных и зарубежных предприятиях за последние годы были изготовлены и внедрены различные технические средства, позволяющие резко уменьшить токсичность газообразных выбросов и снизить концентрацию вредных газов и пыли в рабочих зонах [1].

Специалистами ведущих институтов стран СНГ была выполнена прогнозная оценка состояния атмосферы и предложены способы и средства ее нормализации в карьерах до 2015 г. Эта работа выполнялась методом экстраполяции на основе имеющихся информационных материалов по данной проблеме и фактических данных о составе атмосферы в современных карьерах.

В России прогноз способов нормализации атмосферы включал анализ направлений научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по улучшению условий труда в карьерах и конкретных способов и средств борьбы с загрязнением атмосферы методом экспертных оценок. Была учтена вся соответствующая отечественная и доступная зарубежная литература и патентные материалы, а также возможности технического перевооружения горнодобывающих предприятий [2].

По степени важности проблемы можно классифицировать следующим образом:

период до 2005 г. — пылеподавление, кондиционирование воздуха в кабинах оборудования, нейтрализация отработавших газов, технологические способы уменьшения вредностей, пылеулавливание, искусственное проветривание, естественная аэрация;

период до 2015 г. — кондиционирование воздуха в кабинах оборудования, пылеподавление, нейтрализация отработавших газов, технологические способы уменьшения вредностей, пылеулавливание, искусственное проветривание, естественная аэрация.

Одним из основных источников мгновенного выделения в атмосферу карьеров пыли и вредных газов являются массовые взрывы. Количество одновременно взрываемых ВВ в рудных карьерах колеблется от 200 до 1100 т и более. Концентрация вредных примесей как в облаке, так и в атмосфере карьера, а также в горной массе достигает значительных величин. В пылегазовом облаке пыль присутствует в количестве 0,027—0,17 кг/м³ горной массы; 63—80 % осевшей в карьере пыли имеет крупность менее 1,4 мкм [1]. Количество образовавшейся пыли и ее дисперсность изменяются в широких пределах и зависят в основном от типа и крепости горных пород, степени их обводненности, удельного расхода ВВ. Общее количество образовавшихся оксидов углерода, по данным ВНИИБТГ, достигает 60—93 л/кг ВВ, а оксидов азота 3,5—7 л/кг ВВ [3, 4].

Большинство вредных примесей, образовавшихся при взрыве, выбрасывается в атмосферу карьера с пылегазовым облаком, которое, развиваясь, достигает значительной высоты (до 1,5—1,6 км) и распространяется в атмосфере на расстоянии от 8 до 12 км. При этом пылегазовое облако загрязняет окружающую воздушную среду и прилегающую к карьеру значительную территорию. Степень загрязнения зависит от начальной концен-

трации пыли и вредных газов в облаке. Промышленные исследования дальности распространения пылегазового облака показывают, что на расстояниях, значительно превышающих санитарно-защитные зоны, концентрация пыли в несколько раз превышает предельно допустимую норму. Кроме того, во взорванной массе после взрыва остается значительное количество вредных газов (оксиды углерода и азота), которые при недостаточном воздухообмене могут загрязнять атмосферу карьера в течение длительного времени.

Количество вредных газов и пыли, образующихся при массовых взрывах в карьере, можно снизить с помощью технологических, организационных и инженерно-технических мероприятий, основными из которых являются:

- взрывание ВВ с нулевым или близким к нему кислородным балансом;
- применение водоустойчивых ВВ;
- взрывание на необрабатываемую горную массу;
- взрывание глубоких скважин с воздушными промежутками;
- выбор минимальных расстояний между взрываемыми блоками;
- гидрозабойка скважин;
- применение мощных дождевальных оросителей;
- проведение взрывов в период максимальной ветровой активности и ряд других инженерно-технических и организационных мероприятий.

Уменьшению количества вредных газов также способствует применение при взрывании скважин ГЛТ-20 и порэмита вместо гранулола.

За рубежом на некоторых карьерах используют до 80 % селитренных смесей простейшего состава (АС-ДТ), характеризующихся положительным кислородным балансом, причем Горное Бюро США отмечает, что при увеличении содержания в ВВ дизельного топлива количество вредных газов возрастает [1].

Значительный объем исследований пылегазоподавления при буровзрывных работах и, в частности, массовых взрывах выполнен институтом ВНИИБТГ. Так, совместно с ППП "Кривбассвзрывпром" разработана гидрогелевая забойка (студенеобразная масса, состоящая из аммиачной селитры, жидкого стекла, воды — разновидность гидропаст) для предотвращения взметывания осевшей пыли. Рекомендуется орошать поверхность взрыва-

ваемого блока водой или пылесмачивающими добавками из расчета 10 л/м. Совместно с бывшим институтом "Союзгидроводхоз" на Криворожском гранитном карьере испытана модельная установка импульсного мелкодисперсного орошения с объемом выплеска 200 л с удельным расходом 0,6 л/м². Эффективностью пылеподавления составила 68 % [5]. Для предотвращения отравления горнорабочих ядовитыми газами, выделяющимися из навала горной массы во время экскавации, была отработана технология проветривания взорванных блоков струйными вентиляторами с начальным расходом воздуха в струе 200—300 м³/с (например, типа УМП-1 и др.), для борьбы с токсичными газами на станках огневого и термомеханического бурения разработаны специальные аппараты, снижение выброса токсичных газов достигается также путем использования топливно-водяной эмульсии с определенным содержанием воды. Для снижения выбросов пыли в атмосферу карьера и окружающую среду при производстве массовых взрывов рекомендуется применять гидрозабойку скважин или размещение на поверхности взрываемого блока мягких емкостей, заполненных водой.

Практический и научный интерес представляют работы ряда организаций и авторов, посвященные решению проблемы пылегазоподавления путем применения пены на основе различных составов ПАВ. При этом следует отметить работы Казахского политехнического института, ЦНИЛ ВГСЧ бывшего Минцветмета [6, 7], НИИКМА (г. Губкин), ВНИИПП (г. Березовский Свердловской области) и другие. По данным последнего, высота подъема пылегазового облака уменьшается в 2—3 раза, образующаяся пыль осаждается быстрее в 3—4 раза [8], при применении неионогенных паст выброс пыли сокращается в 5—6 раз, значительно больший эффект пылеподавления дает применение ПАВ типа "Поток" и триэтаноламиновои соли алкилодольфака — снижение залповых выбросов твердых частиц в 5—8 раз [9]. Сравнительные испытания различных типов ПАВ показали, что наиболее эффективным является состав на основе воды и ПАВ, композиция которого содержит 20—70 % натриевой соли динатриевой сульфоянтарной кислоты и спиртов фракции С₇Н₁₂ триполифосфата натрия. Эффективность пылеподавления по сравнению с водой увеличилась с 49,2—67,7 до 82,5—96,1 % [10].

Институтом гигиены морского транспорта в содружестве с промышленными предприятиями был предложен и испытан способ подавления пыли при взрывных работах при отрицательных

температурах путем нанесения слоя искусственного снега на взрываемый блок и прилегающую к нему территорию $g = 7 \div \div 12 \text{ кг/м}^2$. В результате перемешивания пыль поглощалась снегом, что привело к снижению поступления пыли в атмосферу в 3—5 раз.

Институтом горного дела (ИГД, г. Екатеринбург) предложено использовать для подавления вредных примесей в пылегазовом облаке мощные вентиляторы-оросители и дальнотруйные установки. Эксперименты, проведенные в промышленных условиях, показали, что в случае проведения массовых взрывов на нижних горизонтах карьеров, имеющих ограниченные размеры, вентиляторы-оросители НК-12-КВ-1М способны предотвратить выброс продуктов взрыва за пределы карьерного пространства. При этом воздушное пространство обрабатывается непрерывно до взрыва, в момент взрыва и после него. Благодаря предварительной обработке воздуха над местом проведения массового взрыва образуется зона инверсии, которая препятствует выходу пылегазового облака за пределы карьера. При последующей работе этих вентиляторов в оросительно-вентиляционном режиме в течение 35—40 минут можно полностью устранить опасное загрязнение [11, 12].

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения количества пыли является гидрообеспыливание, которое может быть также весьма эффективным для интенсификации процесса дегазации взорванной горной массы. Исследования, проведенные в лабораторных и производственных условиях, показали, что при увлажнении горной массы после взрыва водой с удельным расходом до 50 л/м^3 процесс газовыделения резко ускоряется.

Анализ материалов института Черметинформация [3] показывает, что в зарубежной практике вопросам снижения выбросов пыли и газов при ведении открытых горных работ также уделяется большое внимание. Приведем несколько примеров. В Германии с целью снижения пылегазовыделения регламентируется количество взрывааемых негабаритных кусков — $1/3$ от общего количества — применяются скважины малого диаметра (60—115 мм). В США для сокращения пылевыведения при взрывании скважинных зарядов в качестве забоечного материала предлагается использовать куски льда (минимальный диаметр их должен составлять 5 мм), а также резиновые пробки специальной конструкции. Для уменьшения последствий массовых взрыв-

вов на карьерах и подавления пыли от других источников применяется пена. Оборудование для подавления пыли с помощью пены при добыче, погрузке и транспортировке полезных ископаемых, а также при их дроблении, измельчении и т. д. разработано фирмой "Deter". Пылеподавляющий реагент кохерекс, разработанный фирмой "Witco Chemical Corp" и поставляемый ее отделением "Pionier Divigen", применяют на предприятиях Ризервмаининг и других горных разработках США. Кохерекс представляет собой эмульсию, состоящую из 60 % нефтяных смол и 40 % смазывающего раствора, применяется для пылеподавления на действующих и вновь строящихся автодорогах, а также для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ. Фирма "Eltac Western Inc" (Канада) предлагает пылесвязывающее вещество энтак. Его применяют для предотвращения пыления откаточных дорог и штабелей руды, обработки площадок для кучного выщелачивания. Энтак является органической нетоксичной эмульсией, изготавливаемой из натуральной смолы. Для более удобного использования ее обычно разбавляют водой. При правильной обработке поверхность становится непылящей, водонепроницаемой и удобной для ходьбы и автомобильного движения. Поверхности, обработанные веществом энтак, можно пылесосить, подметать и поливать водой, как асфальтовые покрытия.

Основным источником сверхнормативных загрязнений атмосферы карьеров, приводящих в штилевые периоды к простоям горнотранспортного оборудования по санитарно-гигиеническому фактору, является технологический автотранспорт. Дизельные двигатели карьерных автосамосвалов 40—60 % времени транспортного цикла работают в режиме полной нагрузки, 20—30 % — на частичных нагрузках и 15—20 % — на холостых оборотах. Расход топлива на полной нагрузке составляет 75—85 % общего за цикл, следовательно, наибольшее количество вредных выбрасывается в атмосферу непосредственно при транспортировании горной массы от забойного погрузочного оборудования до пунктов разгрузки.

Анализ вклада основных вредных компонентов отработавших газов: оксидов азота (NO_x), оксида углерода (СО), альдегидов (НСНО), неканцерогенных углеводородов (C_nH_m), 3,4 бенз(а)пирена ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) и сажи (С) — в суммарную токсичность выброса дизелей автосамосвалов, выполненный с использованием методики В. И. Смайлиса [13], показал следующее. При работе двигателя на полной нагрузке до 50 % суммарной токсичнос-

ти выброса составляют оксиды азота, доля сажи с адсорбированным на ней 3,4 бенз(а)пиреном (80—90 %) составляет 40 %, вклад остальных компонентов не превышает 10 %.

За период интенсивных поисковых работ по обезвреживанию отработавших газов исследованы различные способы и средства, включая жидкостную, плазменную, каталитическую и термокаталитическую нейтрализацию [14—19], рециркуляцию ОГ, изменение угла опережения впрыска топлива, инерционную, электрическую и магнитную очистку, применение механических фильтров, включая насыпные, введение антидымных и других присадок в топливо, подачу в цилиндры двигателя воды (пара) с топливом или всасываемым воздухом, введение в ОГ перед выпуском их в атмосферу воздуха, а также твердых или жидких окислителей. Исследовались различные комбинации перечисленных и других способов [20—24].

В стадии изучения с позиций широкого промышленного освоения находятся замена традиционных видов автотранспортных топлив газообразным, в том числе водородом, спиртами и т. п., использование на автотранспорте электрического, газотурбинного, инерционного приводов и комбинаций их как между собой, так и с традиционными дизельным и карбюраторным приводами. Однако к настоящему времени в области уменьшения загрязнения атмосферы автотранспортом практическое применение (причем весьма ограниченное) получили лишь электрооборудование (для транспортных средств небольшой мощности обычно специального назначения), газообразное топливо, рециркуляция, термическая и каталитическая нейтрализация, а также фильтрация ОГ. Последние из перечисленных способов обычно применяются в различных сочетаниях.

Применительно к дизельному автотранспорту в России промышленностью освоены каталитические нейтрализаторы типа НКД-241, предназначенные для карьерных автосамосвалов БелАЗ-540А. Известно о разработке такого нейтрализатора для автосамосвала БелАЗ-548. Срок службы нейтрализаторов названного типа установлен в 20000 км пробега автосамосвала. В них использован платиновый катализатор ШПК-2.

Институтом горного дела УрО РАН произведена опытно-промышленная эксплуатация разработанных им нейтрализаторов типа НКК (каталитический нейтрализатор капсульный). Продолжительность эксплуатации — более четырех лет, пробег около 170 000 км. В нейтрализаторах использовался не содержа-

щий драгоценных металлов меднохромовокисный катализатор "Азнефтехим-670" [25]. Активность катализатора после 4-летней работы составляла более 50 % от исходной. Однако, несмотря на относительно высокие эксплуатационные показатели КНК, эффективность их, как и других известных конструкций отечественных нейтрализаторов, независимо от вида используемого катализатора (предполагаются освоённые отечественной промышленностью катализаторы для автомобильных нейтрализаторов), не превышает 20 % от суммарной токсичности ОГ. Причем относительно основных токсичных компонентов ОГ дизелей — сажи и окислов азота — названные нейтрализаторы неэффективны [20, 22, 24].

За рубежом в нейтрализаторах используются так называемые бифункциональные (трехкомпонентные) катализаторы, составные или объединенные, одновременно воздействующие на окись углерода, углеводороды и окислы азота, изготовленные на основе металлов платиновой группы и редкоземельных элементов. Нейтрализаторы с такими же катализаторами дороги, работа их связана со сложной электронной системой работы двигателя, и предназначаются они главным образом для легковых автомобилей с карбюраторными двигателями. Для обезвреживания ОГ двигателей за рубежом в последние годы все большее предпочтение отдается способу фильтрации ОГ через пористую массу с периодическим выжиганием осевшей на фильтре сажи с помощью специальной горелки [20, 25]. Очевидными недостатками этого способа являются дополнительный расход топлива и сложность эксплуатации.

Институтом горного дела был разработан термokatалитический тип нейтрализаторов с применением специальных горелок и подачей в них дополнительного топлива и атмосферного воздуха [26, 27]. Проведенные широкие лабораторные, стендовые и промышленные испытания нейтрализаторов этого типа показали нецелесообразность широкого освоения их на карьерном автотранспорте.

Изложенное выше приводит к общему заключению об ограниченности применения нейтрализаторов и других им подобных устройств для обезвреживания ОГ дизельного автотранспорта. В то же время применение рециркуляции ОГ не исключает ухудшения топливной экономичности двигателя и повышения концентрации в них горючих токсичных компонентов. Вследствие этого применение рециркуляции целесообразно лишь в сочета-

нии с каталитическими нейтрализаторами и регуляторами количества ОГ, возвращаемых в цилиндры двигателя. Применение термических реакторов для ОГ дизелей экономически не определено [13, 25, 28, 29].

На шведском горнодобывающем предприятии Кируна (Kiruna) на самоходных вагонетках с дизельным приводом с 60-х годов начали применять способ обезвреживания ОГ, основанный на пропускании газов через перевозимую горную массу. Очистка ОГ от сажи при этом достигает 90 %, существенно снижаются концентрация окислов азота и других компонентов [30]. Горная масса в данном случае выполняет по отношению к ОГ роль естественного фильтра. Проходя сквозь навал горной массы, ОГ частично освобождаются от сажи за счет инерционного осаждения ее на стенках фильтрационных каналов. Происходит улавливание и газообразных токсичных компонентов ОГ в результате химического и адсорбционного связывания, а также металлургического окисления горючих компонентов. Эффективность химических реакций зависит от минерального состава, адсорбционных процессов, а главным образом от пористости горной массы. Каталитический эффект увеличивается в местах ввода ОГ в горную массу, на участках с повышенной температурой, поскольку известно, что любая нагретая поверхность обладает каталитическими свойствами. При взаимодействии горячих ОГ с холодной горной массой (преимущественно в осенне-зимний период) происходит улавливание окислов азота за счет растворения последних в конденсате, образующемся из содержащихся в ОГ паров воды и выпадающем на поверхности кусков горной массы.

Центральным научно-исследовательским дизельным институтом (ЦНИДИ) разработано транспортное средство, в котором ввод ОГ в перевозимую горную массу осуществлен в наиболее глубокой части кузова [31]. Но неизбежные при таком вводе засорение и заштыбовка выходных отверстий мелочью, всегда присутствующей в перевозимой горной массе и просыпающейся в нижнюю часть платформы кузова, явились препятствием к внедрению изобретения в промышленность. Впоследствии ЦНИДИ была модернизирована схема, в которой выпуск ОГ предусмотрен не через днище транспортного средства, а через решетку, располагаемую в нижней части передней стенки грузовой платформы. Промышленные испытания этой системы на 27-тонном автосамосвале БелАЗ-540 в ПО "Апатит" показали,

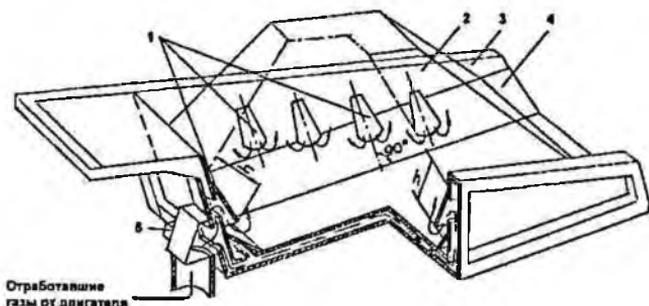


Рис. 1.1. Рекомендуемая схема размещения газывыводящих патрубков:
 1 — газывыводящие патрубки; 2 — навал горной массы; 3 — борт платформы; 4 — наклонная полка платформы; 5 — предохранительный клапан

что при транспортировании скальной вскрыши эффективность очистки (отношение массы связанного компонента к исходной массе ОГ) от оксидов азота (NO_x) составила при движении с грузом на горизонтальном участке 23 %, на подъеме — 34 %. Эффективность очистки ОГ от сажи (С) составила, соответственно, 25 и 37 %, от оксида углерода (СО) — 33 %.

Схема выпуска ОГ через газывыводящие патрубки, установленные на внутренней поверхности передней и боковых стенок грузовой платформы, предложена Институтом горного дела УрО РАН [32—34]. Испытанная также на автосамосвале БелАЗ-540А в условиях комбината «Магnezит» схема обеспечила очистку ОГ по NO_x и СО в среднем на 30 %, сажи — на 60 % [35]. В ходе испытаний на автосамосвале БелАЗ-549 на Оленегорском ГОКе было выявлено, что крайние патрубки на передней и боковых стенках платформы не всегда полностью перекрываются горной массой, в результате чего снижается эффективность очистки ОГ. При расположении газывыводящих патрубков на наклонных полках платформы (рис. 1.1) этот недостаток устраняется.

На 110-тонных автосамосвалах БелАЗ-7519 [1] были испытаны схемы расположения газывыводящих патрубков на стенках платформы (Качарский ГОК, Навоийский горно-металлургический комбинат) и на наклонных полках (Оленегорский ГОК). Установлено, что процесс очистки ОГ от ядовитых газов протекает по сложной характеристике (рис. 1.2), обусловленной дина-

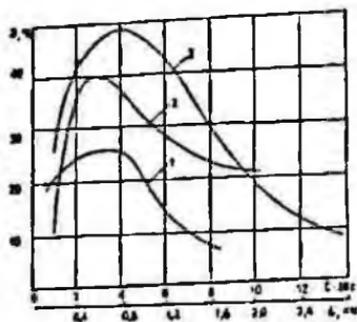


Рис. 1.2. Изменение эффективности очистки ОГ от оксидов азота Э в зависимости от расстояния транспортирования горной массы L:

1 — транспортирование рыхлой искрилки; 2 — транспортирование рулы; 3 — транспортирование горной массы

микой изменения адсорбционных свойств фильтрующей среды при контакте с ней ОГ во время движения груженого автосамосвала. Анализ графиков изменения эффективности очистки ОГ показывает, что этот процесс можно разделить на следующие периоды. Первый период продолжительностью 2—3 минуты после начала движения груженого автосамосвала характеризуется быстрым ростом эффективности очистки ОГ (от 0 до 80 %), второй — плавным снижением эффективности от максимального значения до 15—10 %. Продолжительность второго периода составляет 8—10 минут. В течение третьего периода также продолжается снижение эффективности очистки ОГ, но более замедленно по сравнению со вторым периодом. Продолжительность третьего периода ограничивается временем, когда кривая эффективности очистки ОГ переходит через ноль. По результатам испытаний на нагрузочном стенде Оленегорского ГОКа продолжительность этого периода составляла 20—25 минут. Таким образом, длительность процесса очистки ОГ находится в пределах 30—40 минут, что вполне достаточно для транспортирования горной массы 110-тонным автосамосвалом на расстояние 8—10 км.

Для большегрузных автосамосвалов, оснащенных дизелями с турбонаддувом, у которых имеется достаточно жесткое ограничение на противодействие, оказываемое газовыпускным трактом, — не более 600 мм вод. ст. — важное значение приобретает вопрос о влиянии системы очистки ОГ с использованием перевозимой горной массы на работу двигателей и на эксплуатационные показатели в целом. С этой целью по методике ЦНИДИ были проведены испытания на нагрузочных стендах Навоийского НГМК, Оленегорского и Качарского ГОКов по нагрузочной и универсальной характеристикам (табл. 1.1). Анализ результатов работы двигателей не выходит за пределы номинальных значений. Аналогичные результаты получены при испытаниях авто-

Таблица 1.1

**Результаты стендовых испытаний дизелей автосамосвалов,
оснащенных ССТОГ, с использованием перевозимой горной массы**

Показатель	Номинальное значение	Положение кузова			Номинальное значение	Положение кузова	
		поднят	опущен порожний	опущен груженный рулой		опущен порожний	опущен груженный скалой
Тип автосамосвала, дизеля	БелАЗ-7519, 8ДМ-21				БелАЗ-549, 8РАЧ-185		
Мощность дизеля, кВт	956	906	898	898	702	700	700
Обороты коленчатого вала в минуту	1500	1460	1450	1450	1500	1430	1430
Разрежение после воздушного фильтра мм вод. ст.	570	450	400	400	600	300	300
Противоодавление ОГ перед платформой, мм вод. ст.	600	—	440	500	500	290	342
Давление наддувочного воздуха, кг/см ²	2,25—2,5	—	2,44	2,45	2,5—2,7	1,91	1,91
Температура ОГ, °С	670	465	500	500	650	550	550
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	211(+11)	213,5	217,8	217,8	238(+12)	—	2

самосвалов с двигателями 6ДМ-21 и 8ДМ-21 в условиях карьеров Качарского ГОКа.

В табл. 1.2 представлены данные, характеризующие работу на Оленегорском ГОКе 110-тонного автосамосвала, оборудованного ССТОГ, с использованием перевозимой горной массы. Показатели работы автосамосвала БелАЗ-7519 с выпуском ОГ через горную массу не ниже средних значений по парку 110-тонных автосамосвалов цеха технологического транспорта (ЦТТ) Оленегорского ГОКа. Однако при транспортировании морены в условиях низких отрицательных температур воздуха (ниже -25°C) наблюдалось перекрытие газывыводящих отверстий, что привело к увеличению противоодавления в системе выпуска ОГ и ухудшению работы дизеля. Для исключения этого отрицательного явления Свердловским турбомоторным заводом разработан специальный предохранительный клапан, устанавливаемый на приемном коллекторе грузовой платформы, срабатывающий при повышении противоодавления в системе выпуска ГО до 500—600 мм вод. ст.

Промышленные испытания ССТОГ с тремя типами предохранительных клапанов проведены на карьере Южного рудо-

Таблица 1.2

**Основные технико-экономические показатели работы
110-тонных автосамосвалов ЦТТ Оленегорского ГОКа**

Месяц	Время работы, ч		Объем перевозок, тыс. т		Среднее расстояние транспортирования, км		Коэффициент использования		Удельный расход топлива, г/ткм	
	по ЦТТ	а/с № 57	по ЦТТ	а/с № 57	по ЦТТ	а/с № 57	по ЦТТ	а/с № 57	по ЦТТ	а/с № 57
II	504	563	110	140	1,68	1,45	0,75	0,89	125	116
III	565	592	124	122	1,84	1,79	0,76	0,80	125	121
IV	561	505	120	131	1,69	1,34	0,78	0,70	118	104
V	554	566	116	121	1,70	1,92	0,77	0,78	113	111
III в IV	546	556	117,5	128,5	1,70	1,63	0,76	0,78	120	113

управления комбината "Ураласбест" и карьера Центрального рудоуправления Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК), показали высокую надежность клапанов.

В связи с тем, что очистка ОГ происходит в основном за счет адсорбции ядовитых газов, вполне правомерно возникает вопрос о возможной их десорбции в атмосферу при последующей переработке руды или хранении горной массы, например, в отвалах. Специального исследования по десорбционной обработке горной массы, имевшей контакт с ОГ как стенового, так и установленного на автомобиле дизеля, не показали даже следов контролируемых компонентов (NO_x и CO) в десорбирующем газе.

Лабораторными исследованиями ВНИИБТГ установлено, что в естественных условиях процесс десорбции оксидов азота с железорудной и кварцевой пылью идет очень медленно. Так, за 195 суток хранения с кварцевой порошка десорбировало всего 60 % оксидов азота [36]. Следовательно, ожидать самопроизвольной десорбции связанных горной массой ядовитых газов, которая могла бы заметно загрязнить атмосферу, нет оснований.

Применение ССТОГ с использованием перевозимой горной массы отличается от традиционных тем, что взаимодействие ОГ с фильтрующей средой происходит только во время погрузки и движения груженого автосамосвала, а не в течение всего транспортного цикла. Однако в отличие от каталитических нейтрализаторов фильтрующий элемент описываемой ССТОГ — горная масса — обновляется через каждый транспортный цикл.

К обоснованию целесообразности расширения объемов внедрения ССТОГ с помощью перевозимой горной массы выполнена сравнительная оценка ее эффективности. Базой для сравне-

Таблица 1.3

**Относительная значимость основных ядовитых компонентов ОГ
дизелей карьерных автосамосвалов**

Показатель	Оксид углерода (СО)	Оксиды азота (NO ₂)	Сажа (С)	3,4 бенз(а)-пирен (C ₂₀ H ₁₂)	Угле-породы (СН)	Альде-гиды (НСНО)
ПДК в рабочей зоне карье-ра (C _д), мг/м ³	20,0	2,0	4,0	1,5·10 ⁻⁴	30,0	0,7
Относительная значимость компонентов ОГ (R _i ^{CO})	1,0	10,0	5,0	13,3·10 ³	0,7	28,6

ния принят нейтрализатор типа НКД-241. В качестве критерия оценки эффективности очистки ОГ различными методами принята цикловая приведенная к СО токсичность выброса в атмосферу, учитывающая фактическое время работы двигателя на характерных режимах и массу выброса на каждом из них основных ядовитых компонентов ОГ.

$$M_{\Sigma}^{CO} = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n R_i^{CO} m_{ij} t_j, \quad (1.1)$$

- где M_{Σ}^{CO} — приведенная к СО суммарная величина массового выброса дизеля в течение транспортного цикла, г;
- t_j — продолжительность работы дизеля на характерном режиме ($j = 1, 2, 3 \dots K$) в течение транспортного цикла, с;
- K — число режимов работы дизеля;
- m_{ij} — интенсивность массового выброса i -го компонента ОГ ($i = 1, 2, 3 \dots n$) на характерном режиме работы дизеля, г/с;
- n — число основных учитываемых компонентов ОГ;
- R_i^{CO} — относительная значимость каждого компонента ОГ (табл. 1.3).

$$R_i^{CO} = \frac{C_d^{CO}}{C_d^i}, \quad (1.2)$$

где C_d^{CO} , C_d^i — предельно допустимые концентрации (ПДК) в рабочей зоне карьера оксида углерода и i -го вредного компонента ОГ, мг/м³.

Таблица 1.4

Расчет степени снижения цикловой токсичности дизеля 110-тонного карьерного автосамосвала системами с каталитическими нейтрализаторами типа НКД-241 и с использованием перевозимой горной массы

Основные токсичные компоненты выброса дизеля	Система снижения токсичности дизеля					
	С каталитическими нейтрализаторами типа НКД-241			С использованием перевозимой горной массы		
	Приведенная масса выброса за транспортный цикл, г	Эффективность очистки, %	Связанная масса выброса, г	Приведенная масса выброса за транспортный цикл, г	Эффективность очистки, %	Связанная масса выброса, г
Оксид углерода (СО)	850	75	640	740	20	150
Оксиды азота (NO _x)	6750	12	810	5520	30	1660
Альдегиды (НСНО)	170	78	130	80	н. д.	—
Углеводороды (СН) (неканцерогенные)	350	68	240	260	н. д.	—
Сажа (С)	2160	10	220	1970	60	1180
3,4 бенз(а)пирен (С ₂₀ H ₁₂)	2350	8	190	2170	50	1080
Итого	12630		2230	10740		4070

Выполненный для 110-тонного автосамосвала с плечом откатки горной массы 2 км расчет показал (табл. 1.4), что степень снижения токсичности ОГ в случае применения нейтрализаторов типа НКД-241 составляет порядка 20 %, а при применении ССТОГ с использованием перевозимой горной массы — 30 %.

Таким образом, применение ССТОГ с использованием перевозимой горной массы можно отнести к альтернативному мероприятию по снижению токсичности выбросов дизелей карьерного автотранспорта. Ниже приведена техническая характеристика рекомендуемой к внедрению на карьерах ССТОГ.

Промышленные испытания ССТОГ через перевозимую горную массу, проведены на карьерах Качарского, Оленегорского ГОКов, комбинатов "Магнезит", "Ураласбест", Навоийского ГМК, Сорского молибденового. При этом следует отметить положительный опыт ее эксплуатации и значительный объем внедрения на карьере Центрального рудоуправления Навоийского ГМК, где все кузова при сборке новых автосамосвалов и выполнении капитальных ремонтов оборудуются указанной системой.

При выводе отработавших газов автосамосвалов в перевозимую горную массу целесообразно производить обработку ее водными растворами солей Na₂CO₃ и Na₂SiO₃. В горной массе происходят химические реакции с ОГ, способствующие связыва-

нию токсичных компонентов (сажа, бенз(а)пирен, NO_x , CO_2), и предотвращается их десорбция после разгрузки. Обработку можно производить в момент погрузки либо при проезде груженых автосамосвалов под эстакадой, на которой размещены емкость с раствором солей и распылительные устройства.

Техническая характеристика ССТОГ
с использованием перевозимой горной массы

Область применения	Отечественные автосамосвалы типа БелАЗ
Число газоразрядных патрубков	8—16 (в зависимости от грузоподъемности)
Объемный расход ОГ через патрубок, м ³ /с	0,1
Скорость истечения ОГ через патрубок при работе дизеля на номинальном режиме, м/с	10
Эффективность очистки, %:	
оксиды азота (NO)	30—40
оксид углерода (CO)	20—40
сажа с бенз(а)пиреном	60—70
Степень снижения токсичности ОГ за транспортный цикл (плечо откатки 2 км, 110-й автосамосвал), приведенная к CO, %	30
Противодавление ОГ за турбиной, мм вод. ст.	Не более 600
Снижение грузоподъемности кузова, %	0,3
Срок службы	Определяется сроком эксплуатации грузовой платформы
Удельная трудоемкость монтажа системы, нормо-человекосмен	2
Стоимость оборудования одной машины, руб. (в ценах 1990 г.)	300

Перспективным направлением снижения токсичности транспортных средств, работающих на отечественных карьерах и за рубежом, считается переход к троллейному питанию дизель-электрических автосамосвалов. Как показывают промышленные испытания троллейбусов и технико-экономические расчеты, по сравнению с автомобилями равной грузоподъемности дизель-троллейбусный транспорт имеет следующие преимущества: большую на 5—20 % производительность по транспортированию горной массы при увеличении скорости движения на подъеме на 20—30 %, меньший на 50—85 % расход дефицитного дизельного топлива, что составляет 200—300 т/млн т перевозимой горной массы; выделяет на 50—85 % меньше токсичных веществ, что значительно улучшает санитарно-гигиеническое состояние атмосферы в карьерах; позволяет сократить на 3—8,5 % эксплуатационные расходы и позволяет получить годовой эко-

номпческий эффект до 9—15 тыс. руб/млн т перевозимой горной массы.

Расчеты, выполненные на примере карьера “Мурунтау” Новошешковского горно-металлургического комбината, показывают, что санитарно-гигиеническая обстановка в карьере в значительной степени улучшится при внедрении прогрессивных технологий в сочетании с дизель-троллейвозным транспортом за счет резкого сокращения парка дизельных автосамосвалов и, соответственно, расхода дизельного топлива [12, 37].

Перспективным зарубежным техническим решением проблемы улучшения санитарно-гигиенического состояния атмосферы при работе автотранспорта следует считать применение троллейно-аккумуляторных автосамосвалов с аккумуляторами, способными работать 5—6 лет без ухода. Установлено, что троллейно-аккумуляторный электропривод лишен недостатка дизельного привода, прежде всего, с санитарно-гигиенической точки зрения.

Альтернативу дизельным и троллейно-аккумуляторным двигателям могут составить газотурбинные двигатели, двигатели Стирлинга, Ранка, Брайтона как более экономичные и менее токсичные. Несмотря на то, что в России разработке двигателя Стирлинга уделяется большое внимание, доминирующее положение все же будут занимать дизельные двигатели.

Многообразие и специфика источников пылегазовыделений определяют многообразие организационно-технических мероприятий по нормализации атмосферы карьеров и предотвращению выбросов вредных примесей в окружающую среду, что в системном виде можно представить в виде таблицы (табл. 1.5) [12].

1.2. Влияние климатических условий, горно-геологических и технологических факторов на загрязнение атмосферы карьеров

Важнейшими климатообразующими факторами, определяющими состояние атмосферы карьеров, являются радиационный и ветровой режимы районов расположения, а также синоптическая обстановка.

Радиационный режим района в начальной стадии отработки карьеров обусловлен в основном географической широтой места. На радиационный баланс в атмосфере карьеров существенное влияние оказывают горно-геологические факторы — фор-

ма карьеров (воронкообразные, эллипсовидные, вытянутые в плане — каньонообразные), географическая ориентация большой оси, свойства горных пород, в частности, способность поглощать солнечную энергию, синоптическая обстановка района — облачность, осадки, ветровая активность, формирование задерживающих слоев, а также технологические факторы — интенсивность выделения пыли и газов при работе оборудования.

Ветровой режим района расположения карьеров определяет характер воздухообмена в карьере, параметры температурных и влажностных потоков, перенос пыли и газов, выделяющихся при работе технологического комплекса. По мере увеличения глубины карьеров происходит трансформация ветровых потоков и снижение ветровой активности в рабочих зонах. Существенное влияние при этом оказывают технологические факторы — угол откоса бортов, размещение отвалов горных пород на поверхности и др.

Увеличение глубины карьеров, сопровождающееся изменениями радиационного и ветрового режимов, обуславливает их микроклимат, т. е. характер тепломассообменных процессов.

Изменение радиационного баланса влияет на формирование задерживающих (инверсионных) слоев в атмосфере карьеров и, как правило, при снижении ветровой активности и шттилях приводит к нарушению естественного воздухообмена и увеличению концентрации вредных примесей выше ПДК в рабочей зоне и атмосфере карьера. В качестве примера рассмотрим влияние вышеуказанных факторов на микроклимат карьера “Мурунтау”. Исследования были выполнены нами совместно с сотрудниками Уральского управления гидрометслужбы. Результаты исследований микроклимата карьеров “Мир” и “Удачный”, расположенных в полярных по сравнению с карьером “Мурунтау” условиях, приведены в работе [38]. Благодаря близкому расположению к субтропическим широтам радиационный баланс района с первой половины февраля до середины ноября (9 месяцев) положительный, а с середины ноября до середины февраля близок к нулю или отрицательный.

Исследования выполнялись методом статистического анализа материалов систематических многолетних наблюдений метеостанции г. Тамдыбулак (метеостанция Тамды), расположенной в 40 км от карьера, материалов Узбекского управления гидрометслужбы (г. Ташкент) и методом экспедиционных исследований непосредственно на карьере. В программу экспедиционных

Организационно-технические мероприятия

Система (зона)	Источник пылегазообразования	Измерение параметров атмосферы и прогнозирования ее состояния	Организация ведения горных работ	Совершенствование техники и технологии горных работ
Карьер	<ol style="list-style-type: none"> 1. Буровзрывные работы 2. Технологический автотранспорт 3. Дробилки, конвейерные линии, перегрузочные узлы ЦПТ 4. Эскавация 5. Отвалообразование 6. Породоскаты 7. Полубункерные склады 8. Бульдозеры, рыхлители, автопогрузчики и др. вспомогательное оборудование 	<p>Создание в составе АСУ ТП автоматизированной системы телеконтроля параметров атмосферы, прогнозирование сверхнормативных уровней загрязнения, управление технологическим комплексом средств пылегазоподавления</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Система разработки месторождений с ориентацией на розу ветров 2. Схема вскрытия месторождения и расположения отвалов с учетом естественной вентиляции 3. Отработка карьера этапами 4. Применение ЦПТ-вскрыша и ЦПТ-руда на глубоких горизонтах 5. Экранирование приконтурной зоны 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ВВ с кислородным балансом, близким к 0 2. Рациональные грансоставы забойки и гидрозабойки 3. Троллейбусы на стационарных трассах 4. Перевод дизельных двигателей на природный газ 5. Увеличение грузоподъемности карьерных автосамосвалов 6. Буровые станки с глубиной бурения скважин до 60 м и шланговые ВВ 7. Эскаваторы с удлиненным рабочим оборудованием
Рабочая зона		<p>Размещение в рабочей зоне стационарных автоматических станций контроля атмосферы АС-КА</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Концентрация горных работ 2. Периодическая консервация горных работ 3. Оптимизация схем транспортных потоков 4. Крутонаклонные подъемники 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наклонные и горизонтальные конвейеры на уступах карьера 2. Перемещение грузов по породоскатам 3. Полубункерные аккумулярующие склады 4. Маршруты по кольцевой схеме с наименьшими переподъемами и маневрами 5. Резервирование объемов горнорудной массы к периоду инверсии 6. Перераспределение транспортных по-

Таблица 1.5

по нормализации атмосферы карьеров

Средства и методы предотвращения пылегазообразования в атмосферу	Средства и способы вентиляции и пылегазоподведения	Автономные средства защиты
<p>1. Регулировка топливной системы а/с перед выходом на линию</p> <p>2. Оптимальное с точки зрения аэродинамики и с учетом розы ветров размещение отвалов горных пород</p>	<p>1. Вентиляторы-оросители НК-12КВ-1М, ВОКМ-4-2500</p> <p>2. Вентилятор АВК-35 с экраном воздухоочистки</p> <p>3. Оптимальное с точки зрения аэродинамики и с учетом розы ветров размещение отвалов горных пород</p>	<p>1. Создание систем подачи свежего воздуха в кабины экскаваторов и автосамосвалов с обеспечением их герметичности за счет избыточного давления</p> <p>2. Разработка фильтров автономных кондиционеров для очистки наружного воздуха от сажи, СО, NO и альдегидов</p>
<p>1. Обработка поверхности с нарушенным естественным покровом, откосов, автодорог и отвалов водным раствором полимера К-4, битумной эмульсией и др.</p> <p>2. Смыв пыли и орошение водой автомобильных дорог</p> <p>3. Обработка покрытий дорог вяжущим и гигроскопичными материалами</p>	<p>Мобильные вентиляторы-воздухоочистители типа ВОК-2000 и др. на базе несущих винтов вертолетов серии "КА"</p>	<p>Создание кабин в зоне обслуживания ЦПТ с подачей чистого воздуха</p>

Система (до-на)	Источник пылегазопыления	Измерение параметров атмосферы и прогнозирование ее состояния	Организация ведения горных работ	Совершенствование техники и технологии горных работ
Рабочая площадка		Обеспечение оперативного персонала, машинистов экскаваторов и буровых станков средствами экспресс-контроля	1. Временная консервация группы уступов 2. Оптимизация направления развития горных работ на рабочих уступах 3. Безбункерные и полубункерные аккумулярующие склады	токов в период инверсии 1. Увеличение емкости ковшей экскаваторов ЭКГ-8И до 10 м ³ , ЭКГ-12,5 до 14—16 м ³ 2. Повышение высоты добычных и вскрышных уступов

исследований входили круглосуточные градиентные наблюдения на отметках дно — поверхность, круглосуточные измерения скорости ветра, радиозондирования атмосферы карьера. Градиентные наблюдения проводили с помощью аспирационных психрометров МВ-4 м, суточных термографов, измерение температуры производили с помощью максимальных и минимальных термометров. Приборы устанавливались на специальных стойках. Психрометры подвешивались на двух уровнях — 0,5 и 1,5 м. Интервал измерения параметров 1,5 часа, привязка показателей термографа к абсолютному прибору проводилась через 3 часа.

При наблюдениях проводилось определение суточного хода температуры, влажности воздуха в приземном слое, температуры почвы, расчет градиентов этих параметров, определение периодов формирования инверсий в суточном ходе температуры воздуха. Температуру почвы измеряли для выявления влияния радиационного выхолаживания на формирование внутрикарьерных инверсий.

Для определения характера деформации ветрового потока в карьере и влияния глубины на изменение скорости ветра производились анемометрические наблюдения, которые заключались в измерении скорости и направления ветра на поверхности и дне

Средства и методы предотвращения выбросов газа в атмосферу	Средства и способы вентиляции цехов и пылегазоподведения	Автономные средства защиты
<ol style="list-style-type: none"> 1. Применение мокрого пылеподавления при буровых работах 2. Взрывание высоких уступов с воздушными промежутками 3. Забойка скважин с нейтрализующими добавками 4. Орошение взрываемого уступа водой или воздушно-механической пеной, укладка на устье скважин полиэтиленовых оболочек с водой 5. Дробление негабарита гидротермическими, электрическими способами 6. Гидрообеспыливание при экскавации 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вентилятор-ороситель УМП-1 (выпускается серийно) 2. Универсальный вентилятор-ороситель-пеногенератор ВОК-300П 	<p>Применение индивидуальных средств защиты (гермошлемы и защитные маски с избыточным давлением)</p>

карьера с помощью анемометров МС-13, устанавливаемых на стойках на высоте 2 м, направление ветра определяли ветрометром.

Радиозондирование атмосферы карьера производилось с помощью привязного радиозонда А-22, подъем которого осуществлялся с помощью метеорологических оболочек № 150 (200), заполняемых водородом. Водород получали на месте выпуска радиозонда в генераторах, используемых на стационарных аэрологических станциях. Запись сигналов радиозонда (закодированные значения давления, температуры, относительной влажности) осуществлялась на ленту ондулятора с последующей их обработкой. Сигналы от радиозонда к ондулятору передавались по проводной связи либо по радиоканалу.

Изучение ветрового режима карьера выявило ряд особенностей, характерных для данного района. Исследования в 1980—1988 гг. показали, что преобладающее восточное направление в районе метеостанции Тамды в декабре 1980 г. и марте-апреле 1981 г. менялось, соответственно, на северное на поверхности и северо-западное на дне. В 1983 г. в районе метеостанции Тамды преобладали ветры северо-восточного направления, на поверхности карьера — северного, а на дне — северо-восточного и восточного. Процент повторяемости ветра восточного и северо-

восточного направления в районе метеостанции Тамды в 1989 г. значительно меньше (в 1,5—2 раза), чем в предшествующие годы. Преобладающее в весенний период северного и западного направлений ветровых потоков обусловлено циркулирующей воздушных масс в разрушающемся отроге азиатского антициклона. Для выявления причин, вызывающих в районе карьера трансформацию ветровых потоков, по сравнению с их направлением на метеостанции Тамды, необходимо рассматривать в комплексе синоптическую обстановку над данным районом и местные условия (орография местности).

В результате экспедиционных исследований в 1980—1983 гг. установлено, что максимальную вероятность 33 % имеют ветровые потоки северного направления на поверхности карьера, на дне карьера — северо-восточного (38 %), а в районе метеостанции Тамды — западного (16—22 %). Вероятная продолжительность штилевых периодов для поверхности, метеостанции Тамды и дна карьера, соответственно, составляет 3; 13; 37 %.

Вероятность ветровых потоков по скоростной градации составляет:

Поверхность	Дно карьера	Тамды
0—2 м/с.....48 %	0—2 м/с.....80 %	0—2 м/с.....75 %
2—5 м/с.....30 %	2—5 м/с.....20 %	2—5 м/с.....18 %
6 м/с.....22 %		6 м/с.....7 %

Анализ материалов измерения скорости ветровых потоков за период экспедиций 1980, 1981 и 1983 гг. показал, что скорость ветра на дне карьера снижается в 1,5—4,0 раза по сравнению с поверхностью, что является одним из неблагоприятных условий естественного воздухообмена. Для анализа были использованы материалы наблюдений на карьере “Мурунтау” в период с 28 марта по 10 апреля 1983 г. и синхронные наблюдения на метеостанции Тамды за тот же период. При этом была рассмотрена связь между среднесуточными значениями температуры воздуха и почвы на поверхности, влажности воздуха. Для установления связи между метеоэлементами метеостанции Тамды и района карьера “Мурунтау” рассчитывались коэффициенты парной корреляции первого порядка. Уравнения регрессии метеопараметров находились методом наименьших квадратов. Для определения сдвига по времени между анализируемыми параметрами рассчитывались взаимные ковариационные и корреляционные функции (табл. 1.6). Из анализа данных следует, что между среднесуточными значениями температуры, влажности, скорости ветра на поверхности и дне карьера и этими же параметрами, по

Таблица 1.6
Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции
для оценки связи метеопараметров

Параметр	Обозначение	Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции	
		для поверхности	для дна
Среднесуточная температура воздуха	T_n	$T_n = -1,0664 + 1,0051T_{\tau}$ $k = 0,965$	$T_{no} = -0,0744 + 0,997T_{\tau}$ $k = 0,986$
Среднесуточная температура почвы	T_n	$T_n = -1,047 + 0,935T_{\tau}$ $k = 0,934$	$T_n = 0,797 + 0,951T_{\tau}$ $k = 0,965$
Среднесуточная относительная влажность	f_n	$f_n = 3,196 + 0,888f_{\tau}$ $k = 0,713$	$f_{no} = -6,158 + 1,0383f_{\tau}$ $k = 0,756$
Среднесуточная скорость ветра	U	$U_n = 0,671 + 2,0436U_{\tau}$ $k = 0,834$	$U_n = 0,755 + 0,583U_{\tau}$ $k = 0,674$
Вероятность направлений ветровых потоков, %	W	$W_n = 3,064 + 0,515W_{\tau}$ $k = 0,329$	—

данным метеостанции Тамды, существует тесная связь, а по вероятности направлений ветровых потоков весьма слабая. Однако для ЮЗ направления ветра корреляционная связь является тесной ($k = 0,85$).

На основе обработки материалов радиозондирования атмосферы на метеостанции Тамды, расположенной в районе схожих с карьером метеорологических условий, за 1975—1979 гг. установлены следующие особенности распределения температуры в приземном слое воздуха. Вероятность появления инверсий в утренние часы (W_{03}) в течение года изменяется от 47 до 77 %, в дневные часы (W_{15}), за исключением февраля (39 %) и декабря (22 %), не превышает 5 %; в вечерние часы (W_{21}) изменяется от 37 % (декабрь) до 59 % (июль). Среднесуточная вероятность появления инверсий изменяется от 35 % (март) до 45 % (январь), среднегодовое значение $W = 41$ %.

Среднесуточная толщина слоя инверсии изменяется от 650 м (январь) до 220 м (август, октябрь), среднегодовое значение $H = 410$ м.

Вертикальное распределение температуры воздуха в карьере значительно сложнее, чем в свободной атмосфере, и зависит, кроме циркуляционных факторов, от высоты места и формы рельефа. В карьерах, имеющих замкнутую форму рельефа, для которых характерно застаивание воздушных масс, подстилающая поверхность приобретает значение важного фактора.

Таблица 1.7
Характеристика неблагоприятных условий атмосферы карьера "Мурунтау"

Сезон года	Глубина инверсии	Вероятность инверсии	Вероятность ветра по градации скорости				Вероятность загрязнения W_3
			$U = 0$	$U \leq 2$	$2 < U < 5$	$6 < U$	
Весна	330	0,57	0,13	0,36	0,28	0,23	0,18*
Осень	390	0,57	0,18	0,30	0,32	0,20	0,25
Зима	560	0,55	0,11	0,36	0,30	0,23	0,25

*По данным НИЛ-20.

В результате анализа изменения температурного градиента в карьере и над его поверхностью по данным радиозондирования атмосферы установлено, что в придонном слое воздуха (0—25 м) при переходе от вечерних часов к утренним состояния интенсивной конвекции сменяется глубокой инверсией. Над этим слоем практически по всей глубине карьера (до $H = 150$ м) образуются задерживающие слои, над поверхностью карьера также образуется устойчивый задерживающий слой.

Анализ неблагоприятных метеоусловий (табл. 1.7) показал, что вероятность сочетания штилей с инверсиями составляет весной 7 %, осенью 10 % и 5 % зимой. В результате отбора проб (NO_2) установлено, что вероятность загрязнения атмосферы карьера окислами азота составляет весной 18 % и 25 % осенью и зимой. Соответствующие фактическим значениям вероятности неблагоприятных метеоусловий можно получить, если учесть, что при скорости ветра $U \leq 2$ м/с происходит загрязнение атмосферы карьера. То есть для расчета вероятности продолжительности таких периодов необходимо брать $0 < U \leq 2$.

Поскольку загрязнение атмосферы оксидами азота отмечено в основном в ночные и утренние часы (0—9 час), то можно определить продолжительность периодов нарушений естественного воздухообмена:

$$T_{II} = \sum_{i=1}^m n_{ci} \tau_3 W_3, \quad (1.3)$$

где n_{ci} — количество дней в сезоне года; $n_{св} = 61$, $n_{ос} = 91$, $n_{з} = 90$ дней (св — весна, ос — осень, з — зима);
 τ_3 — продолжительность периода загрязнения, $\tau_3 = 9$ ч;
 W_3 — вероятность загрязнения.

Таблица 1.8

**Характеристика штилевых периодов в районах расположения
железородных карьеров**

Район	Вероятность появления штилей в течение года, %	Суммарная продолжительность штилей, ч	Вероятность появ- ления сочетаний штиля с приземной инверсией, %	Суммарная продол- жительность соче- тания штилей с ин- версией, ч
Украина	8,0	700	1,4	130
Центр	10,0	880	1,9	170
Казахстан	12,0	1050	5,7	500
Урал	22,0	1930	13,8	1210
Северо-Запад	33,0	2890	18,8	1650
Сибирь	50,0	4380	30,0	2720

В результате исследований определена продолжительность периодов с неблагоприятными метеоусловиями для железородных карьеров Казахстана, России и Украины (табл. 1.8) [39].

1.3. Оценка дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьеров при температурных инверсиях

Из факторов, способствующих развитию инверсионного состояния атмосферы карьеров и ухудшению естественного воздухообмена, преобладающими являются климатические и горно-геологические.

При исследованиях микроклимата карьеров [40] установлено, что мощность инверсии для конкретного карьера не является величиной постоянной, а зависит как от периода года, так и от времени суток. При этом имеются для данного периода года и суток вполне определенные максимальные значения температурного градиента ($dy_{II}/dt = 0$).

Поскольку системы искусственной вентиляции должны обеспечить нормальные санитарно-гигиенические условия при самых неблагоприятных сочетаниях факторов, способствующих развитию и сохранению инверсии, расчет их максимальной энергоемкости (количества вентиляторов $n_{II\max}$) следует производить по разности полных энергий атмосферы карьеров, соответствующих адиабатическому и инверсионному состояниям. При этом $\gamma_{II\max} < 0$ определяется на основании статистической обработки метеоданных, характеризующих состояние атмосферы конкретного карьера. Периоды года и суток при $\gamma_{II} < \gamma_{II\max}$ будут лишь определять необходимое на дан-

ный период количество средств искусственной вентиляции ($n_n < n_{\text{вmax}}$).

Впервые оценка энергоемкости систем общеобменной вентиляции была произведена А. А. Вершининым для воронкообразных карьеров [41]. Однако использованный в работе математический аппарат не позволяет определять как внутреннюю энергию системы $E_{\text{в}}$, так и потенциальную $E_{\text{п}}$ при $\gamma = 0$ и $\gamma = -g/R$. Кроме того, в расчетных формулах нет важного определяющего параметра — глубины карьера H_k . Более точный результат позволяет получить разложение в исходных уравнениях первых сомножителей в ряды.

В связи с тем, что полная энергия атмосферы карьера остается постоянной при адиабатических переходах системы из одного состояния в другое, дефицит энергии неустойчивости может быть рассчитан на основании уравнения [41]:

$$\Delta E_y = (E_{\text{п}} + E_{\text{в}})_a - (E_{\text{п}} + E_{\text{в}})_{\text{н}}, \quad (1.4)$$

где индексы а — относятся к адиабатическому состоянию ($\gamma = \gamma_a \cong 0,01 \text{ К/м}$); и — к инверсионному ($\gamma < 0$);

$E_{\text{п}}$ — потенциальная энергия системы, Дж;

$E_{\text{в}}$ — внутренняя энергия системы, Дж.

Поскольку на величину ΔE_y определяющее влияние оказывает γ , то при $\gamma = \text{idem}$, $H_k = \text{idem}$, $\gamma H_k/T_0 = \text{idem}$, $V_k = \text{idem}$ объем любого карьера может быть аппроксимирован усеченным конусом. При этом величины $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{в}}$ определяются из уравнений

$$E_{\text{п}} = \pi g \rho_0 \int_0^{H_1} \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0}\right)^{\frac{g}{\gamma R} - 1} \cdot (r_0 + h \cdot \text{ctg} \alpha)^2 h \cdot dh, \quad (1.5)$$

$$E_{\text{в}} = \pi C_v \rho_0 T_0 \int_0^{H_1} \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0}\right)^{\frac{g}{\gamma R}} \cdot (r_0 + h \cdot \text{ctg} \alpha)^2 dh, \quad (1.6)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

ρ_0 — плотность воздуха у дна карьера, кг/м^3 ;

γ — температурный градиент, К/м ;

C_v — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/кг К ;

T_0 — температура воздуха у дна карьера, К ;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/кг К ;

r_0 — радиус дна карьера, м ;

α — средний угол наклона борта карьера, град.

Значения E_n и E_v вычисляются путем разложения первых сомножителей под знаком интегралов в ряды.

В результате получены итоговые уравнения для вычисления внутренней и потенциальной энергий:

$$E_v = \pi C_v \rho_0 T_0 H_k \left[r_0^2 \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{\pi}{2\gamma R}} + r_0 H_k \operatorname{ctg} \alpha \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{2\pi}{3\gamma R}} + \frac{H_k^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{3} \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{3\pi}{4\gamma R}} \right], \quad (1.7)$$

$$E_n = \frac{\pi g \rho_0 H_k}{2} \left[r_0^2 \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{2}{3} \left(\frac{\pi}{\gamma R} - 1 \right)} + \frac{4}{3} r_0 H_k \operatorname{ctg} \alpha \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{3}{4} \left(\frac{\pi}{\gamma R} - 1 \right)} + \frac{H_k^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{3} \left(1 - \frac{\gamma H_k}{T_0} \right)^{\frac{4}{5} \left(\frac{\pi}{\gamma R} - 1 \right)} \right]. \quad (1.8)$$

При форме карьера, отличающейся от воронкообразной, в формулы (1.7) и (1.8) следует подставить приведенные значения $r_{\text{опр}}$ и $\alpha_{\text{опр}}$. В общем случае

$$r_{\text{опр}} = \sqrt{\frac{F_0}{\pi}}, \quad (1.9)$$

где F_0 — площадь дна карьера, м²;

$$\operatorname{ctg} \alpha_{\text{опр}} = \frac{\sqrt{F} - \sqrt{F_0}}{H_k \sqrt{\pi}}, \quad (1.10)$$

где F — площадь верхнего основания карьера, м²;

H_k — глубина карьера, м.

Значения F_0 и F могут быть определены с помощью планиметра по планам карьеров.

В частном случае, при близкой к пирамидальной форме карьера, из формул (1.9) и (1.10) получим

$$r_{\text{опр}} = \sqrt{\frac{a_0 b_0}{\pi}}, \quad (1.11)$$

$$\text{ctg} \alpha_{\text{опр}} = \frac{\sqrt{ab} - \sqrt{a_0 b_0}}{H_k \sqrt{\pi}} \quad (1.12)$$

где a_0 — ширина дна карьера, м;
 b_0 — длина дна карьера, м;
 b — длина карьера у поверхности, м;
 a — ширина карьера у поверхности, м;
 H_k — глубина карьера, м.

Если в верхнем и нижнем основании карьера эллипс, то из формул (1.9) и (1.10)

$$r_{\text{опр}} = \sqrt{a_0 b_0}, \quad (1.13)$$

$$\text{ctg} \alpha_{\text{опр}} = \frac{\sqrt{ab} - \sqrt{a_0 b_0}}{H_k}, \quad (1.14)$$

где a_0 — длина малой полуоси эллипса у дна карьера, м;
 b_0 — длина большой полуоси эллипса у дна карьера, м;
 a — длина малой полуоси эллипса у поверхности, м;
 b — длина большой полуоси эллипса у поверхности карьера, м;
 H_k — глубина карьера, м.

Для оценки энергоёмкости систем общеобменной искусственной вентиляции карьеров по формулам (1.7) и (1.8) разработана программа расчета на ЭВМ.

Анализ расчетов (табл. 1.9) показывает, что для перевода атмосферы карьеров из инверсионного состояния ($\gamma = -0,05$ К/м) в адiabатическое ($\gamma = -0,01$ К/м) потребуется (5,31—13,03) 10 Дж. Это эквивалентно количеству тепла, выделяющегося при полном сгорании (12,3—30) т керосина.

Время разрушения температурной инверсии можно рассчитать по формуле:

$$\tau = \frac{\Delta E_y}{\eta n G_{\tau} H_n}, \quad (1.15)$$

Таблица 1.9

**Оценка дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьеров
при температурных инверсиях**

Карьер	Параметры карьера						Дефицит энергии неустойчивости, Дж·10 ⁴
	$V_0, \text{м}^3 \cdot 10^3$	$H_0, \text{м}$	$L_0, \text{м}$	$B_0, \text{м}$	$r_0, \text{м}$	σ_{00}	
Михайловский	11,46	200	6000	2500	372	8,76	13,03
Лебединский	4,91	280	4500	2350	209	3,46	8,00
Стойленский	5,66	325	2500	2300	180	3,10	10,7
"Мир"	1,51	450	1073	1073	55	1,07	5,31
Центральный комбината "Ураласбест"	5,5	260	3800	1500	150	4,58	8,24

где n — количество установок;

G_T — часовой расход топлива ТВД одной установки, кг/ч;

H_{II} — теплотворная способность топлива, Дж/кг;

η — к. п. д. процессов сгорания в ТВД ($\eta = 0,97 \div 0,98$).

1.4. Интенсификация воздухообмена в карьерах

По мере отработки карьеров происходит трансформация ветровых потоков и резкое снижение их скорости у дна и в придонных слоях. Снижение ветровой активности может привести к накоплению вредных примесей выше ПДК и к необходимости прекращения производства.

Существует множество способов предотвращения снижения интенсивности естественного воздухообмена [42—53]. К числу пионерных следует отнести предложение Я. З. Бухмана, суть которого заключается в установке с наветренной стороны карьеров заграждений с проранами [42]. ВНИИгалургии для обеспечения безотрывного обтекания и изменения скорости и направления ветровых потоков предлагает устанавливать с наветренной стороны карьера вращающийся цилиндр [43]. Определенный эффект могут обеспечить способы интенсификации естественного воздухообмена с помощью заграждений, устанавливаемых в карьерах с наветренной стороны на опорах [44] либо на аэростатах [45].

ИГД АН КазССР для проветривания карьеров нагорного типа предлагал наносить черные покрытия в горных ущельях, прилегающих к карьеру, и устанавливать гибкие убирающиеся пе-

ремы: как в поперечном сечении ущелья [46]. Гипотетически возможно применение способа проветривания карьеров, предусматривающего создание конвективных восходящих потоков, формирующихся в изолированном селективной пленкой ифран объеме карьера [47]. За счет поглощения солнечной радиации селективной пленкой в карьере происходит нагрев воздуха, и после уборки пленки "термики" выпускаются из карьера, вынося вредные примеси.

Для ввось строящихся карьеров эффективными могут явиться предложения ВостНИГРИ [48], предусматривающие расположение на бортах с максимальной отметкой отвалов в виде терриконов, а также якутского филиала СО АН СССР [49] — формирование отвалов вокруг карьера в виде спирали Архимеда.

Основным недостатком перечисленных способов интенсификации естественного воздухообмена является то, что они не обеспечивают снижения загрязнения окружающей среды, т. к. предусматривают вынос из карьера загрязненного воздуха и неэффективны при неблагоприятных метеоусловиях (штили с инверсиями).

К числу перспективных с экологической точки зрения следует отнести предложения, предусматривающие размещение на поверхности карьеров водяных (паровых) завес [50, 51]. Для ввось строящихся карьеров целесообразно, по нашему мнению, размещать отвалы (с их рекультивацией) горных пород по румбам ветровых потоков с образованием сужающихся каналов с наветренной стороны и расширяющихся с подветренной по всей розе ветров [52]. В проранах необходимо размещать водяные завесы для очистки поступающего в карьер и выходящего из него воздуха. При отрицательных температурах вместо воды можно применять пар. Перспективным является предложение о создании на дне карьеров водоемов, над которыми распыляется вода [53]. Образующиеся при этом "термики" обеспечивают очистку циркулирующего в районе бассейна воздуха.

В условиях штилей и инверсий, достигающих по продолжительности 20 % рабочего времени, способы интенсификации естественного воздухообмена неэффективны, а способы и средства борьбы с вредными примесями, обеспечивая нормальные санитарно-гигиенические условия на рабочих местах, не могут улучшить санитарное состояние атмосферы карьеров в целом при увеличении их глубины и предотвратить загрязнение окружающего воздушного бассейна. Поэтому целесообразно исполь-

зование мощных средств искусственной вентиляции и пылегазоподавления.

На основании аналитических и экспериментальных исследований было предложено несколько способов искусственного проветривания карьеров: через подземные выработки, вертолетами, вентиляторами, установленными на бортах карьера, самоходными вентиляторными агрегатами, создающими вертикальные свободные струи, турбореактивным двигателем [54—62].

Доказав низкую эффективность проветривания карьеров через подземные горные выработки, С. С. Филатов и А. А. Вершиня аналитически обосновали целесообразность использования вентиляторов с возможно большим диаметром рабочего органа, в качестве которого были предложены авиационные воздушные винты [63]. Ими же был предложен более эффективный, по сравнению с использованием вертолетов, путь решения проблемы за счет использования вертолетных несущих винтов, создающих восходящие свободные турбулентные струи [64]. Впоследствии рациональность предложенного способа была подтверждена как расчетами, так и результатами промышленных испытаний [65—69]. В результате выполнения большого объема экспериментальных и опытно-конструкторских работ ИГД МЧМ СССР и института НИПИГормаш были созданы и доведены до промышленного внедрения вентиляторные установки УМП-14 (ВУ-1), УМП-21 (ВУ-2) на базе несущих винтов вертолетов Ми-1 и Ми-14 [69,70].

Практическая проверка вертолетов в качестве средств проветривания показала их непригодность вследствие дополнительного пылеобразования при зависании на малых высотах, дороговизны эксплуатации и повышенной опасности полетов в карьерном пространстве. Более перспективным, по нашему мнению, может оказаться комбинация аэростата тороидальной формы и мощного генератора турбулентных струй — газотурбинного двигателя [71].

При разработке средств местного проветривания, создающих горизонтальные и наклонные струи, были использованы как серийно выпускаемые промышленные вентиляторы Проходка-500, СВМ-660, ВОКД-1,8, ВРС № 8 [71, 73—75], так и разработанные институтами НИПИГормаш и ИГД МЧМ СССР [76—78] установки УМП-1 на шасси автомобиля БелАЗ-548 с воздушным винтом диаметром 3,6 м, которые в настоящее время находятся в серийном производстве (УМП-1).

Экспериментальные исследования, послужили основой для разработки институтами НИИОГР, ВНИИГМ им. М. М. Федорова и Донгипроуглемаш специального вентилятора ПВУ-6 [79].

В 1960 г. кафедрой рудничной вентиляции Криворожского горнорудного института (КГРИ) была разработана первая в СССР вентиляторная установка на базе турбореактивного авиадвигателя (ТРД) ВК-1 в автомобиля ЗИЛ-130 [80]. Результаты испытаний вентилятора показали, что он позволяет создавать воздушно-водяные струи и тем самым активно подавлять витающую пыль и растворимые газы.

На Сибайском карьере применялась модернизированная турбореактивная установка УВУ-1 на шасси автомобиля БелАЗ-540, спроектированная институтом Унипромедь при содействии Казанского проектного бюро машиностроения. Установка снабжена поворотным устройством с отклоняющими лопатками, имеет газовый эжектор и систему дополнительного подогрева потока. Хорошая мобильность и относительно небольшие габариты позволяют использовать ее для различных целей [81, 82]. Вследствие большого расхода топлива и высокого уровня шума установки такого типа могут быть использованы для улучшения условий труда на карьерах лишь при работе в оросительно-вентиляционном режиме и наличии звукоизолирующего эжекторного насадка. Применение турбореактивных двигателей, оборудованных газовыми эжекторами, было предложено К. В. Кочневым и С. С. Филатовым и аналитически обосновано в работах [63, 83—85].

Идея применения турбовинтовых авиадвигателей в качестве средств искусственной вентиляции была впервые предложена С. С. Филатовым, А. А. Вершининым. Результаты практического воплощения идеи изложены в работах Института горного дела МЧМ СССР [86—91]. Авторами исследований обоснована целесообразность применения ТВД в результате сравнительного анализа их характеристик с ТРД, ДТРД и промышленными шахтными вентиляторами; определены аэродинамические и санитарно-гигиенические характеристики и параметры воздушно-водяных струй опытно-промышленных образцов вентилятора АИ-20КВ, а также область рационального применения вентиляторов подобного типа; рекомендованы рациональные режимы эксплуатации.

Промышленная проверка эффективности вентиляторных установок АИ-20КВ (ТВД самолета ИЛ-18), предназначенных для

проветривания карьеров объемом до $20 \cdot 10^6$ м³ и глубиной до 100 м, послужила основой для разработки мощного карьерного вентилятора-оросителя НК-12КВ и создания на их базе на ряде крупных карьеров систем общеобменной искусственной вентиляции [91—95].

Предложенные для проветривания карьеров различные проекты вентиляторов на базе ДТРД [96—99] имеют низкую экономическую эффективность и неконкурентоспособны с вентиляторами на базе ТВД [91].

По нашему мнению, как ТРД, так и ДТРД могут быть использованы в качестве генераторов паро-воздушных струй и снега. Промышленные испытания тепловых установок свидетельствуют о принципиальной возможности использования их в качестве источников мощных конвективных струй, однако существенными и неустраняемыми недостатками установок такого типа являются низкая экономичность и загрязнение окружающей среды продуктами неполного сгорания топлива [100—105].

Внедрение мощных средств искусственной вентиляции карьеров способствовало интенсивному развитию в этой области теоретических и экспериментальных исследований [65, 106—121]. В работе В. В. Степанова предложен новый способ управления проветриванием зон карьера с помощью встречных струй, создающих восходящие вихревые потоки [116]. Однако вопросы пылеподавления при использовании вихревого способа проветривания проработаны недостаточно глубоко. В работе Е. М. Левина, Ю. В. Суслина, В. В. Пака на основании экспериментальных исследований модели винтомоторной группы самолета Ан-10 делается вывод о низкой экономичности вентиляторов на базе авиационных винтов [121]. Следует однако отметить, что авторами не учтена возможность повышения к. п. д. воздушных винтов у наземных установок за счет размещения винтомоторной группы в профилированном кожухе. Сотрудниками Днепропетровского горного института [122] проведен эксперимент с целью ликвидации локальных загрязнений в атмосфере карьера трубка “Мир” о помощью термикомов, образующихся при распылении воды дальнеструйными дождевальными установками. Вследствие низкой степени диспергации воды область применения этого способа ограничена небольшими карьерами.

1.5. Зарубежный опыт в области создания средств контроля воздушной среды

Актуальность создания и внедрения приборов и систем контроля и методов анализа загрязнений воздуха, воды и почвы обусловлена обострением экологических проблем, приобретших в настоящее время в ряде случаев остро-конфликтный характер.

Анализ многочисленных литературных источников позволяет сделать ряд обобщений и выявить основные направления и тенденции развития газоаналитических приборов для контроля загрязняющих веществ. Из общих тенденций следует в первую очередь выделить широкое использование микропроцессорной техники, позволяющей обрабатывать результаты измерений и выдавать их в цифровой форме, усреднять и суммировать показания за определенный интервал времени.

Все газоанализаторы выполнены в унифицированных корпусах с одинаковыми органами управления и визуализации, что позволяет легко компоновать приборы в стойки и производить замену. Унифицированы электронные схемы, а также частично газовые — отбор и подготовка проб, линия подачи калибровочного газа. Эта тенденция присуща и японской фирме "Ricken" [134]. Универсальные взрывозащищенные корпуса применяет фирма "Cerberus" (Швейцария) для газоанализаторов с полупроводниковыми и электрохимическими датчиками на H_2S , CO , NO_x , NH_3 , Cl_2 и др.

Еще одна тенденция — миниатюризация приборов, обусловленная появлением современной микроэлементной базы и новых материалов и выразившаяся в создании переносных, персональных и индикаторных дозиметров малых габаритов и массы. Наибольшие достижения в этом направлении — электрохимические приборы. Сюда же следует отнести тенденцию создания комбинированных приборов, предназначенных для решения комплексных задач, требующих одновременного анализа нескольких компонентов. Преимущество такого подхода — экономия электроэнергии и массы за счет использования одного источника питания и одного индикаторного прибора и микропроцессора, а также возможность корректировки показаний датчиков.

Различные комбинированные приборы выпускает фирма "Ricken". В их числе газосигнализаторы, портативные газоанализаторы, газоанализатор выхлопных газов и портативный инфракрасный газоанализатор CO , CO_2 , HC и др.

Одним из самых простых и эффективных средств газового анализа являются индикаторные трубки (ИТ), основанные на линейно-колориметрическом методе. Ведущей в этом направлении является фирма "Dräger" (ФРГ), выпускающая ИТ различных конструкций для экспресс- и усредненного в течение какого-либо времени анализа более 350 различных газов, паров и аэрозолей. Фирма выпускает также детекторы, в которых используются ИТ. Широкую номенклатуру ИТ предлагают фирмы "Awer" (ФРГ), "Хегитест" (Болгария).

Основными достижениями последних лет в области создания электрохимических анализаторов и детекторов являются: расширение области применения; совершенствование чувствительных элементов; улучшение метрологических характеристик; миниатюризация конструкции. Электрохимические газоанализаторы используются для анализа токсичных компонентов в воздухе — H_2S , CO , SO_2 , NO_x , Cl_2 . В последние годы диапазон измеряемых компонентов существенно расширился: появились новые разработки, обеспечивающие анализ гидридных газов, HCl , N_2H_4 , HCN и др. токсичных элементов в атмосфере и воздухе рабочих помещений.

Фирма "Ricken" выпускает серию портативных высокочувствительных газоанализаторов типа SC-7 для анализа PH_3 , AsH_3 , SiH_4 , B_2H_6 , HCl , Br_2 . В газоанализаторах используется микроЭВМ, позволяющая определять среднюю концентрацию газов в течение 1,5—15 мин. Широкий спектр электрохимических детекторов для анализа Cl_2 , H_2S , SO_2 , HCl , HCN , N_2H_4 , NO_x выпускает фирма "Interscan". В зависимости от компонента детекторы имеют несколько диапазонов измерения: от 0—5 до 0—250 ppm.

Одна из важных тенденций современного приборостроения — миниатюризация — особенно ярко проявляется в электрохимических датчиках. Передовые позиции в этой области занимают фирмы "Ricken", "Interscan", "Dräger" и др., выпускающие легкие переносные (до 2—3 кг) и индивидуальные (0,30—0,1 кг) электрохимические газоанализаторы на широкую гамму компонентов. Сверхминиатюрные электрохимические датчики на H_2S , CO , Cl_2 , H_2 , HCN , разработаны фирмой "Sieger" (Великобритания).

Одним из новых направлений в газоаналитической технике является создание химических сенсорных датчиков (ХСД) — миниатюрных, дешевых, при изготовлении которых используется технология микроэлектроники. Преимущества ХСД особенно

существенны при анализе микроконцентраций загрязняющих веществ в воздухе.

Одним из перспективных направлений, преимущества которого для контроля загрязнений воздушной среды очевидны, является использование в газоаналитических приборах волоконно-оптических элементов. Волоконно-оптические линии связи и световоды широко применяются в зарубежных газоанализаторах, обеспечивая возможность работы в труднодоступных местах при наличии вредных для человека условий, простоту и безопасность эксплуатации [131—132].

Исследования в области радиоэлектроники и взаимодействия радиоволн с веществом привели к созданию квантовых генераторов, известных под названием мазер и лазер. Первооткрывателями в этой области являются А. М. Прохоров, П. Г. Басов и Чарльз Харт Таунс, лауреаты Нобелевской премии.

Монохроматическое излучение лазера открыло новые возможности для спектроскопических исследований электронной оболочки атомов и молекул. После 1970 г. появились лазеры с переменной частотой излучения, что позволило плавно регулировать длину волны излучения и обеспечивать точное соответствие энергии фотонов частоте перехода между энергетическими уровнями в атоме.

Кроме измерений концентраций компонентов воздушной среды отдельными газоанализаторами и газосигнализаторами за рубежом широко используются различные измерительные системы охраны окружающей среды, предусматривающие измерение концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны, в промышленных и транспортных выбросах. Автоматизированные системы контроля окружающей среды регистрируют и оценивают имеющуюся нагрузку окружающей среды и представляют основу для принятия решения с целью сохранения чистоты воздуха и предоставляют общественности и инспекционным органам богатую информацию об условиях окружающей среды.

Системы контроля чистоты атмосферного воздуха выполняются либо в виде стационарных станций, либо передвижными. Количество таких станций во всем мире велико: в Японии круглосуточно работают 1700 станций, в ФРГ — 270, Австралии — 150. Системы, как правило, включают измерительные приборы непрерывного действия на отдельные компоненты, основанные на одинаковом или различных методах измерения; в качестве из-

мерительных могут использоваться универсальные приборы — хроматографы, масс-спектрометры, хромато-масс-спектрометры.

Многолетний опыт эксплуатации показывает целесообразность использования для измерения основных загрязнителей воздуха — CO , SO_2 , NH_3 , O_3 , NO_x и др. — традиционных высокоселективных, воспроизводимых и стабильных методов оптического анализа: инфракрасного, ультрафиолетового, хемилюминесцентного, пламенно-фотометрического и пр.

В состав систем входят устройства обработки и представления результатов обычно на базе ЭВМ и устройства проверки, калибровки и диагностики работы элементов системы. Кроме того, отдельные приборы могут быть снабжены микропроцессорными устройствами или микро-ЭВМ, выполняющими функции обработки данных и управления работой газоанализаторов.

В функции ЭВМ, входящих в состав местных станций контроля состояния окружающей среды, входит опрос измерительных приборов с минутным, получасовым, суточным интервалом, автоматическое переключение диапазонов измерений датчиков; линеаризация нелинейных характеристик соответствующих измерителей; переключение газовых линий при многоточечном отборе проб; диагностика состояния аппаратуры.

Аналогично комплектуются и передвижные системы контроля. Известная своими работами в этой области фирма "Biotronik" (ФРГ) комплектует передвижные системы оптическими газоанализаторами фирм "Maihak" и "Bendix". Фирма "FEST-ALPINE" разработала и применяет интеллектуальную автоматическую систему "JIOMAC", обеспечивающую анализ O_2 , CO , CO_2 , NO_x , SO_2 , CH_4 и других компонентов по запросу. При этом используются ИК, УФ, термо(пара), магнитный пламенно-ионизационный и термо-кондуктометрические методы [124, 131]. В системе обеспечивается автоматический режим эксплуатации, запуска и остановки, градуировки, передачи сигналов, извещения о неисправностях, выбора зонда и т. п. за счет применения современной системы с программируемой памятью, оснащенной монитором.

Для инспекционного контроля источников промышленных выбросов целесообразно применение простых мобильных оснащенных блоками электронной обработки и оценки данных сигнализаторов переносных систем. Подобные системы в виде комбинированных приборов выпускает ряд фирм Германии

("MSJ2500", "ECOM", "Тестотепм 31" и пр.). Эти приборы снабжены системами отбора и подготовки пробы, электрохимическими ячейками на каждый из компонентов со значительным ресурсом работы: для обработки данных, управления работой приборов и самодиагностики.

Швейцарская фирма "Cerberus" предлагает газодетекторную и газосигнальную систему с микропроцессорным управлением. В системе использованы газоанализаторы трех типов — полупроводниковые для детектирования горючих газов и паров, с палисторными детекторами для тех же компонентов и с электрохимическими детекторами на H_2S , CO , NO_2 , NH_3 , Cl_2 и прочих токсичных газов. Система характеризуется стабильностью к температурным влияниям за счет внесения температурной компенсации в результаты измерения. Возможность применения источников произвольного питания позволяет использовать детекторы различных типов и схем. В системе предусмотрен длительный контроль результатов измерений с анализом неисправностей.

Фирма "Неотроник" (Великобритания) производит электронную систему наблюдения за составом рудничной атмосферы в виде персональных газоанализаторов Эксотокс, определяющих концентрацию до пяти газов одновременно, температуру воздуха и относительную влажность. Выпускают три модели — Эксотокс 60, Эксотокс 70 и Эксотокс 75. Каждая модель измеряет концентрацию кислорода, воспламеняющих газов и токсичных компонентов: монооксида углерода, сероводорода, диоксида серы, хлора и диоксида азота. В зависимости от модели результаты измерений выдаются различным образом: от простейшего дисплея на жидких кристаллах (Эксотокс 60) до электронной памяти, в которую закладывают результаты непрерывного (в течение 30 ч) измерения концентраций газов (Эксотокс 75). Результаты могут быть проанализированы персональной ЭВМ. Модели 70 и 75 запрограммированы на подачу сигнала тревоги при значениях концентрации газов, превышающих ПДК. Все модели предназначены для ношения на поясе или на груди [135].

ГЛАВА 2

СРЕДСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЯ В КАРЬЕРАХ

2.1. Целесообразность применения воздушных винтов и газотурбинного привода при создании карьерных вентиляторов

Работами, проведенными ИГД МЧМ СССР, ДГИ и другими институтами, было установлено, что использование подземных выработок или труб для целей искусственной вентиляции карьеров хотя и может дать некоторый локальный эффект, но для общекарьерного проветривания по экономическим соображениям неприемлемо. Теоретическим путем и моделированием было установлено, что задача эта может быть успешно решена с помощью системы вентиляционных струй (свободных, полуграниченных, ограниченных), обеспечивающих активный вынос загрязненного воздуха за пределы карьера и достаточную подвижность его в зоне проветривания. Струи в карьерном пространстве могут быть созданы как вентиляторами, серийно выпускаемыми нашей промышленностью (осевыми и центробежными), так и вентиляторными агрегатами, созданными на базе авиационных винтов изменяемого шага. В силу специфических условий открытых горных работ (большие объемы выработанного пространства, достигающие нескольких десятков, а в ряде случаев нескольких сотен миллионов кубических метров; подвижность фронта горных работ; быстрое изменение метеорологических условий) вентиляторные агрегаты, предназначенные для проветривания карьеров турбулентными струями, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь большую производительность, высокий к. п. д. по динамическому напору, небольшой вес и габариты, автономный привод; обладать хорошей мобильностью и простотой в управлении.

Анализ показал, что использование для целей вентиляции карьеров промышленных и шахтных вентиляторов главного проветривания невозможно вследствие большого веса (до 200—300 тыс. кг) и габаритов (6 × 6 × 46 м), несмотря на то, что они имеют довольно большую производительность (до 600 м³/с) и относительно высокий к.п.д. по динамическому напору (до 0,42) [36]. Помимо этого, было установлено, что производительность и к. п. д. осевого вентилятора по динамическому напору при работе без противодействия увеличиваются при уменьшении диаметра втулки.

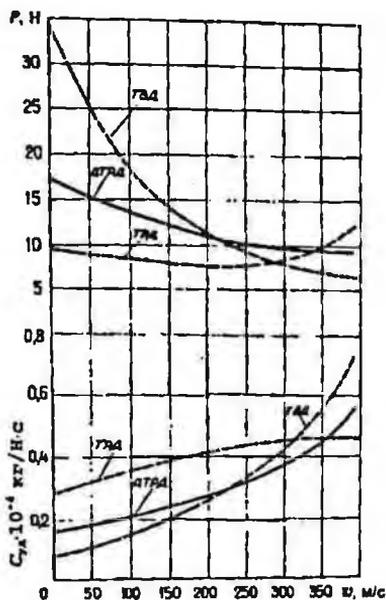
Например, вентиляторы серии К-23 при относительном диаметре втулки $\bar{d} = 0,35$ имеют к. п. д. 0,65, определенный по динамическому напору на выходе из проточной части, а вентиляторы серии К-06 при $\bar{d} = 0,6$ имеют $\eta_n = 0,42$ [37]. В этом отношении винты имеют большее преимущество по сравнению с осевыми вентиляторами благодаря минимальному диаметру втулки. Вентиляторные агрегаты, созданные на базе авиационных воздушных винтов, имеют производительность до 1300 м³/с и к. п. д. по динамическому напору до 80 % (НК-12КВ), при этом вес и габаритные размеры позволяют сохранить мобильность установки. Учитывая, что разработка специального рабочего органа, имеющего более высокие аэродинамические качества, для карьерных вентиляторных агрегатов является сложной задачей и требует длительного времени, целесообразно на первом этапе использовать для этих целей авиационные воздушные винты.

С целью определения основных закономерностей течения и установления количественных зависимостей свободных струй, создаваемых авиационными воздушными винтами, в лаборатории вентиляции карьеров ИГД МЧМ СССР была выполнена серия экспериментальных работ на моделях самолетных и вертолетных винтов. Эти исследования позволили предложить методику приближенного расчета параметров свободных струй, создаваемых авиационными воздушными винтами [138—140]. На основании выполненных исследований были разработаны проекты и изготовлены опытные образцы самоходных оросительно-вентиляционных установок ОВ-1 и ОВ-2, соответственно, с электрическим приводом воздушного винта и дизельным [141—143]. Положительный опыт эксплуатации установок ОВ-1 и ОВ-2 дал основания для разработки более мощной и усовершенствованной установки ОВ-3 [144].

Созданные ИГД МЧМ СССР совместно с ГБРУ самоходные установки ОВ-1 с электроприводом винта, ОВ-2 и ОВ-3 с дизельным приводом позволили сделать вывод о целесообразности создания аналогичных установок большей мощности, пригодных для общего проветривания карьеров. В связи со значительной мощностью, необходимой для привода таких установок (3000—15 000 кВт), и целесообразностью сохранения их мобильности от наиболее желательного с гигиенической точки зрения электрического привода пришлось отказаться.

В настоящее время все более широкое и разнообразное применение в народном хозяйстве находят авиационные двигатели;

Рис. 2.1. Скоростные характеристики газотурбинных двигателей.
 P — тяга двигателя; C_{32} — удельный расход топлива; v — скорость движения самолета.



снятые с летной эксплуатации. Наиболее приемлемыми для целей искусственной вентиляции являются силовые установки турбовинтовых самолетов. Их достоинством является то, что они объединяют в себе мощную малогабаритную газовую турбину, компактный планетарный редуктор и воздушный винт изменяемого шага. Снятые с летной эксплуатации силовые установки, как показали результаты стендовых испытаний и промышленной проверки, имеют еще достаточно большой моторесурс (10 000 часов) и могут работать, при необходимости, на дизельном топливе и газе. При периодическом или эпизодическом применении вентиляторных установок моторесурс турбовинтовых силовых установок достаточен для их работы в течение нескольких лет.

Сказанное позволяет считать, что из имеющихся технических средств для искусственной вентиляции карьеров наиболее приемлемы в настоящее время турбовинтовые двигатели, являющиеся более экономичными (более чем в 3 раза) по сравнению с реактивными двигателями (рис. 2.1). Привод рабочего органа вентилятора с помощью газовой турбины имеет преимущества и перед электроприводом: компактность, малый вес, отсутствие необходимости в большом резерве установленной мощности карьерных электроподстанций.

2.2. Рабочие характеристики турбовинтовых двигателей при работе в вентиляторном режиме

Режим работы турбовинтовых двигателей определяется при постоянных внешних условиях двумя параметрами: числом оборотов двигателя n и расходом топлива G_r . От сочетания этих параметров и внешних условий зависят мощность двигателя, тем-

пература газов перед турбиной, удельный расход топлива и другие показатели.

К основным характеристикам ТВД относятся зависимости эквивалентной мощности $N_{\text{экв}}$, мощности по валу двигателя N_e , реактивной тяги P_R и удельного расхода топлива $C_{\text{уд}}$ от n и G_T . Мощностные и тяговые характеристики строятся в широком диапазоне изменения n и G_T , однако из-за необходимости обеспечения механической и тепловой прочности, а также устойчивости процессов, работа двигателя допускается только в сравнительно узкой области режимов [145]. Границами этой области являются линии режимов (рис. 2.2), характеризующиеся предельными значениями основных показателей работы: а) линия предельно допустимого числа оборотов двигателя; б) линия предельно допустимой мощности по валу двигателя; в) линия предельно допустимой температуры газов перед турбиной; г) линия предельных режимов, допустимых по условиям устойчивости потока в компрессоре (линия помпажа); д) линия предельно допустимых режимов по условиям устойчивости горения (линия срыва пламени); е) линия критического числа оборотов. Эти линии в сочетании с линиями процесса приемистости и предельных расходов топлива G_T образуют замкнутую область (АГДВЖЗЕ) допустимых режимов работы ТВД, лежащую внутри области безопасных режимов. На рис. 2.3 представлены графики изменения приведенного удельного расхода топлива $C_{\text{уд}} = f(N_e)$ и угла установки лопастей винтов $C_{\text{уд}} = f(N_e)$, из которых следует, что в наземных условиях наиболее экономичным является взлетный режим — $N_e = 1,25$, для которого $C_{\text{уд}} = \text{min}$. Однако время работы двигателя на этом режиме ограничено линиями $N_{\text{пр}}$, $T_{\text{пр}}$ и $n_{\text{пр}}$ (см. рис. 2.2). В то же время необходимо отметить, что в области режимов 0,85—0,95 номинала у графика $C_{\text{уд}} = f(N_e)$ выпуклость сменяется на вогнутость, что свидетельствует об уменьшении скорости увеличения приведенного удельного расхода топлива. В этом интервале режимов время работы двигателя не ограничено, при этом $\varphi_{\text{опт}} = (37—39)^\circ$.

Теоретическими исследованиями [146, 147] установлено, что параметры ТВД с оптимальной программой регулирования $n = \text{const}$, $T_e^* = \text{const}$ могут быть существенно улучшены на крейсерских режимах по сравнению с $V = 0$. Анализ скоростных характеристик (рис. 2.4) свидетельствует о том, что с увеличением скорости полета эффективная мощность ТВД N_e растет интенсивно, а реактивная тяга P_R уменьшается; при этом удельный

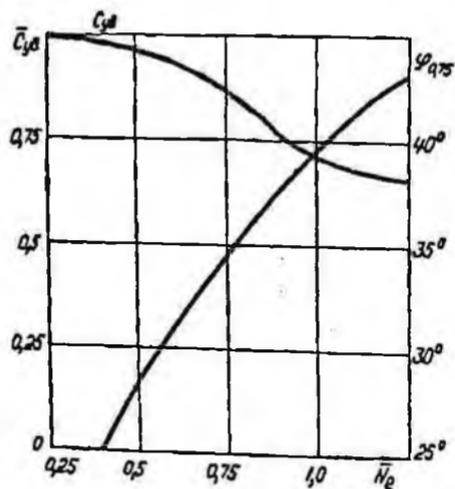


Рис. 2.3. К оценке экономичности режимов работы ТВД

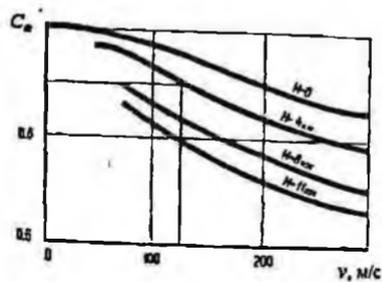
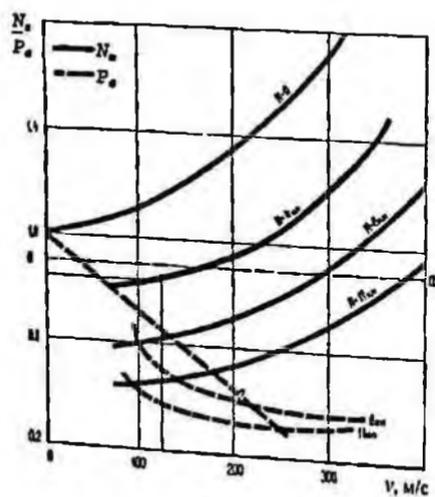


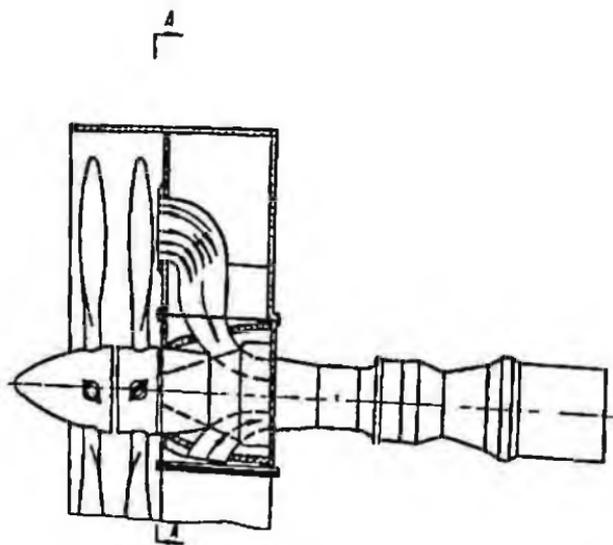
Рис. 2.4. Скоростные характеристики ТВД

расход топлива C_c существенно уменьшается, что приводит к улучшению экономичности. Это объясняется следующими причинами. С увеличением скорости полета степень расширения газа в турбине возрастает вследствие увеличения суммарной степени сжатия, что приводит при $T_z^* = \text{const}$ к увеличению теплоперепада, срабатываемого на турбине, и росту удельной эффективности мощности. По этой же причине, несмотря на некоторое снижение удельной реактивной тяги $P_{R_{\text{уп}}}$, происходит увеличение эквивалентной мощности ТВД. Одновременно возрастает расход воздуха через двигатель за счет повышения давления на выходе из компрессора. Таким образом, увеличение $N_{\text{эф}}$ и N_c с увеличением скорости полета V являются результатом одновременного увеличения удельной мощности $N_{\text{уд}}$ и весового расхода воздуха G_v .

Снижение относительной тяги P_R обусловлено более интенсивным увеличением V по сравнению со скоростью истечения газов из турбины C_v , вызванного возрастанием теплоперепада, срабатываемого на турбине. Уменьшение C_c с ростом V происходит как вследствие увеличения N_c , так и коэффициента избытка воздуха α за счет снижения разности температур $(T_z^* - T_k^*)$. Физической причиной снижения C_c с увеличением V является возрастание суммарной степени сжатия и связанное с этим повышение эффективного к. п. д. двигателя η_c .

Необходимо отметить, что для полного использования рассмотренных скоростных характеристик редуктор должен быть рассчитан на N_{max} , которая получается при полете с V_{max} у земли. Однако это привело бы к чрезмерному увеличению габарита и веса редуктора, а следовательно, и всего двигателя. Поэтому для уменьшения веса расчет редуктора и двигателя производят не на V_{max} у земли, а на меньшую, обеспечивающую как взлет самолета, так и требуемую скорость полета на расчетной высоте. При этом потребуются ограничения для редуктора расчетной эффективной мощности ТВД (на рис. 2.4 линия Oa). Области скоростных характеристик, лежащие выше линии ограничения Oa , использованы быть не могут.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при работе на земле топливную экономичность самолетного ТВД можно улучшить за счет наддува компрессора. Для этой цели производится отбор воздуха из зоны максимальных скоростей струи, создаваемой воздушным винтом, с помощью специального воздухозаборника (рис. 2.5) [148]. Как следует из рис. 2.4



A-A

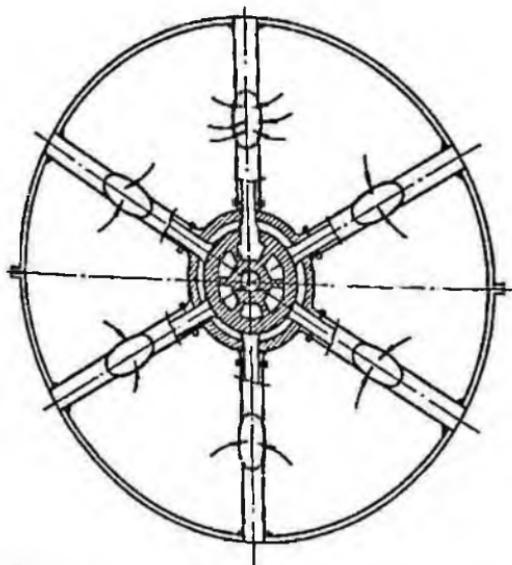


Рис. 2.5. Рекомендуемая схема воздухозаборника двигателя карьерного вентилятора

мощность, равную 0,85 номинала, можно обеспечить при скорости надува $V = 125$ м/с (линия N_e , соответствующая $H_n = 4000$ м). При этом C_e уменьшится на 5 %, а суммарная тяга останется неизменной: производится только перераспределение между P_n и P_R .

В теории газотурбинных авиационных двигателей [146] известно несколько способов увеличения тяги. Наиболее распространенный способ форсирования тяги заключается в сжигании дополнительного топлива перед турбиной и реактивным соплом. Однако при работе на земле этот способ форсирования тяги ухудшает экономичность двигателя, так как для увеличения тяги на 30 % необходимо увеличить удельный расход топлива на 70 %. Другим способом форсирования тяги газотурбинного двигателя является охлаждение воздуха, поступающего в компрессор. Из всех возможных приемов охлаждения воздуха предпочтение отдается впрыскиванию воды, спирта и их смесей. В результате испарения жидкости в воздухе от последнего отнимается тепло, равное теплоте парообразования жидкости, что приводит к уменьшению коэффициента политропы, работы, необходимой для сжатия воздуха до заданного давления, и температуры конца сжатия. Поэтому если работа, затрачиваемая на сжатие воздуха, сохраняется неизменной, то возрастает давление на выходе из компрессора, т. е. его степень сжатия. Вследствие этого увеличивается давление за турбиной, что приводит к возрастанию степени расширения газов в реактивном сопле. В результате скорость истечения из реактивного сопла и связанная с ней тяга увеличиваются. Кроме того, с увеличением давления перед турбиной при той же температуре T_* увеличивается и весовой расход воздуха через двигатель.

На рис. 2.6 представлено теоретически возможное увеличение тяги при впрыске жидкости в воздухозаборник двигателя. Несмотря на то, что впрыск в компрессор испаряющейся жидкости является эффективным средством увеличения тяги, необходимо иметь в виду, что количество жидкости, которое может своевременно испариться, ограничивается временем пребывания ее в компрессоре. Когда парциальное давление паров данной жидкости достигает давления ее насыщенного пара при температуре на выходе из компрессора, испарение в компрессоре полностью прекращается. Предельное отношение для метанола $G_M/G_{\text{воз}} \approx 4$ %, для воды $G_W/G_{\text{воз}} \approx 6$ %.

Путем подбора смеси метанол — вода (~3 : 7) можно избежать регулирования расхода топлива или площади сечения дви-

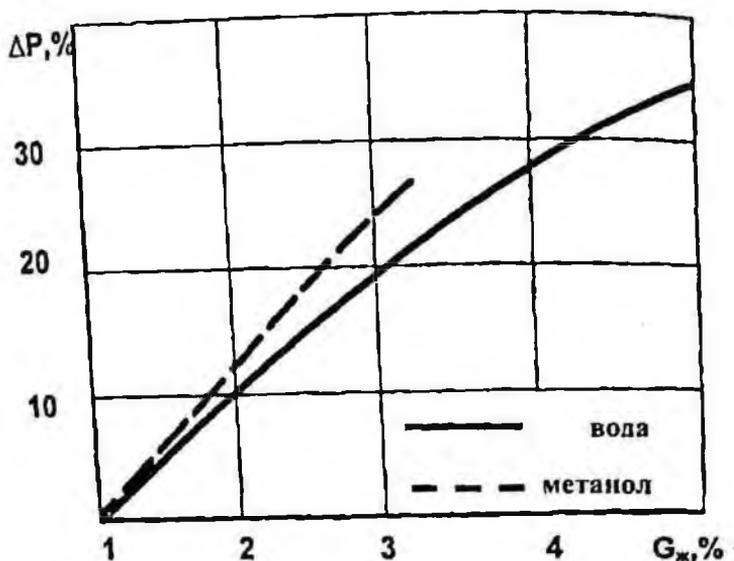


Рис. 2.6. Влияние впрыска жидкости в воздухозаборник на тягу двигателя

жущегося реактивного сопла. Смеси вода—метанол остаются жидкими при отрицательных температурах.

Из графика $\Delta P = f(G_{ж})$ (см. рис. 2.6) следует, что при введении в компрессор двигателя воды $G_{ж} = 5\%$ прирост тяги газотурбинного двигателя составляет 33%. На основании расчетов установлено, что при этом прирост секундной кинетической энергии составит $dN = dN/N_0 = 0,68$. Поскольку у ТВД, в отличие от ТРД, мощность, затраченная на создание реактивной струи, составляет ~12% от эффективной мощности N_e (подводимой к винту), то прирост эквивалентной мощности $dN_{эки} = 0,082N_e$. Так как $N_{эки} = 1,12 N_e$, прирост $dN_{эки}$ распределяется следующим образом: $dN_e = 0,72$, $dN_{эки} = 0,01$. Поскольку в интервале рабочих режимов двигателя $N_e = 0,85 \div 0,95$ (см. рис. 2.3) $dC_{уд}/dN_e \approx -1$, то при $dN_e = 0,72$ $dC_{уд} = -0,72$ (7,2%). Таким образом, впрыск воды в компрессор ТВД ($G_{ж} = 5\%$) приводит к снижению удельного расхода топлива на 7%, т. е. улучшаются технико-экономические показатели ТВД.

Возможен также способ форсирования тяги за счет впрыска воды непосредственно в камеру сгорания. Однако для сохранения температуры $T_2^* = \text{const}$ потребуется увеличение расхода топлива. При одинаковом увеличении тяги двигателя форсаж впрыском в камеры сгорания требует значительно большего

расхода воды по сравнению с впрыском через компрессор. Кроме того, по мере увеличения подачи воды в камеры сгорания компрессор может попасть в область неустойчивых режимов работы вследствие уменьшения расхода воздуха.

Анализ возможных способов увеличения тяги или мощности авиадвигателя свидетельствует о том, что наиболее приемлемым для наземных установок, в частности вентиляторов, является впрыск жидкости в компрессор. Этот способ позволит также улучшить гигиенические характеристики ТВД за счет растворения токсичных компонентов выхлопа. В конструкции вентилятора НК-12КВ-1М предусмотрена реализация этого способа [86, 149]. Для этой цели в передней части кожуха вентилятора располагается внутренний трубчатый контур, через форсунки которого разбрызгивается перед компрессором в летнее время вода, а в зимнее — смесь воды с метанолом.

2.3. Конструктивные элементы карьерных вентиляторов на базе ТВД

Выбор профиля насадка и исследование его влияния на начальные параметры струи вентилятора*

Опыт промышленной эксплуатации экспериментального образца вентилятора НК-12КВ [92] показал необходимость доработки его конструкции с целью улучшения аэродинамических, гигиенических и эксплуатационных характеристик (рис. 2.7). Очевидно, что насадок (кожух) должен иметь геометрические параметры, обеспечивающие работу воздушных винтов с максимальным к. п. д. При этом на основе анализа работ [150—153] нами был сделан выбор величин зазора между насадком и концом лопасти, радиуса кольца, глубины расположения винта в насадке и длины насадка (кожуха).

Зазор. Экспериментальные данные показывают, что величина зазора $s = s/l$ (l — длина лопасти) практически не сказывается на потребляемой вентилятором мощности. Однако коэффициент влияния зазора $\eta_{\text{зая}}$ на давление вентилятора одновременно является коэффициентом влияния зазора на к. п. д. вентилятора в целом. Под величиной $\eta_{\text{зая}}$ понимается отношение η/η_0 , где η — к. п. д. при данном зазоре, а η_0 — к. п. д. при нулевом зазоре. Установлено, что при $s = 0,01$ $\eta = 0,35$, при $s = 0,02$ $\eta = 0,82$ [150].

*Написано совместно с канд. техн. наук А. И. Павловым.

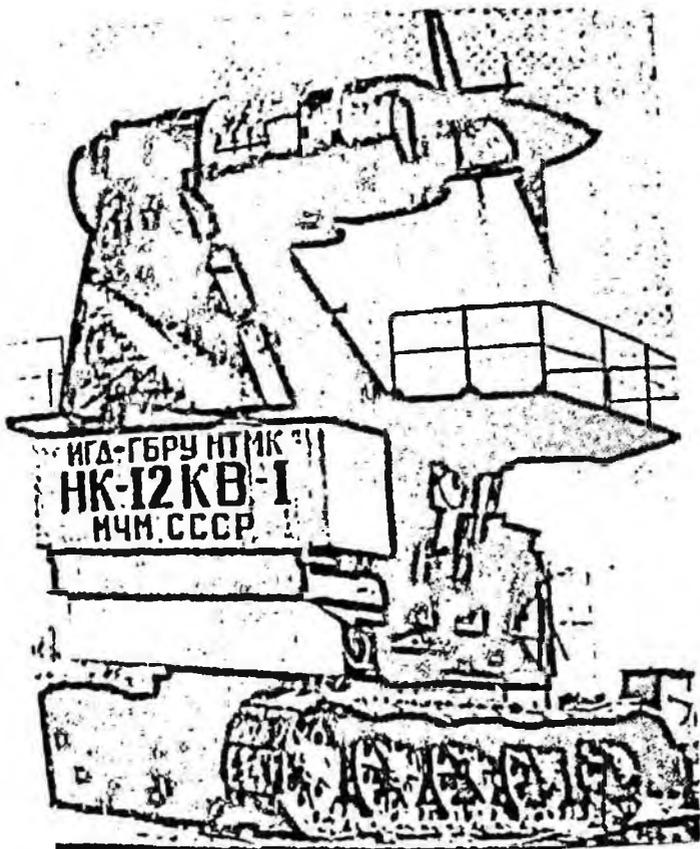


Рис. 2.7. Карьерный вентилятор НК-12КВ (без кожуха)

Учитывая сложность изготовления кожуха диаметром 5,6 м с нулевым эксцентриситетом, мы приняли зазор 50 мм (т. е. $s = 0,02$ при длине лопасти $R = 2350$ мм).

Входной элемент вентилятора НК-12КВ. Из экспериментальных работ, проведенных в ЦАГИ, по исследованию форм входных коллекторов выяснилось, что коллектор с наибольшим диаметром 1,2—1,4 и длиной 0,2—0,4 диаметра колеса обеспечивает удовлетворительные условия входа воздуха в вентилятор, в то же время отсутствие коллекторов значительно ухудшает работу вентилятора. Давление, создаваемое вентилятором на рабочих режимах, и максимальный к. п. д. могут при этом уменьшиться на 10—15 %. При выборе формы кольца (коллектора) мы базировались в основном на работах [151, 152].

Рис. 2.8. График зависимости ширины кольца от радиуса

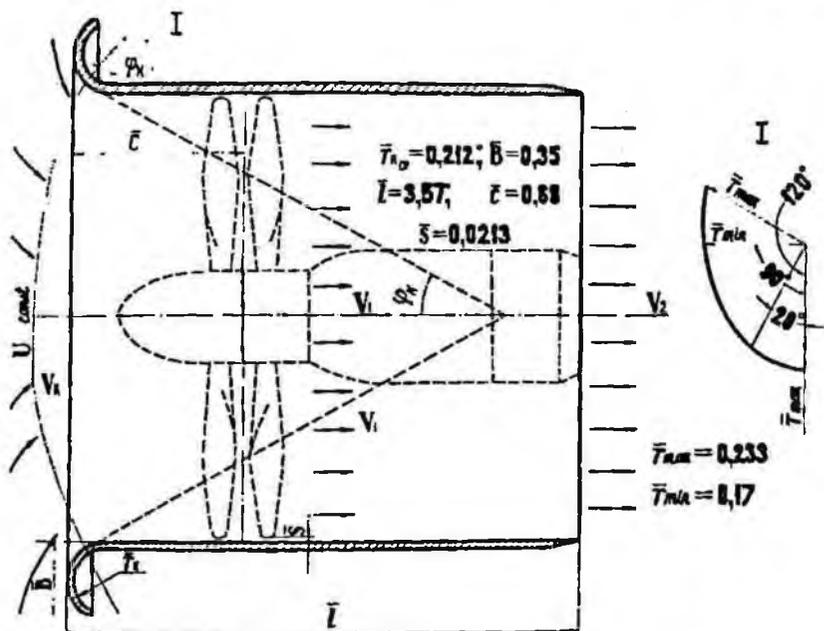
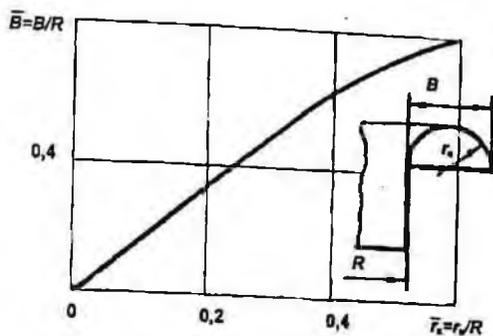


Рис. 2.9. Схема кожуха, принятая в проекте вентилятора НК-12КВ

Сущность работы системы винт—кольцо заключается в следующем. Разрежение, создаваемое воздушным винтом, распространяется по передней поверхности кольца и поддерживается в основном центробежными силами частиц воздуха, подходящих к винту. На задней поверхности давление равно атмосферному. Разность этих давлений ΔP создает дополнительную тягу, тягу кольца.

Из имеющихся гипотез, подтвержденных результатами экспериментов, следует, что целесообразно выбирать кольца с меньшей кривизной поверхности, так как они имеют большие площади несущей поверхности π , в конечном итоге, создают большие центробежные силы. При этом желательно принимать максимально возможную ширину кольца, определяющую площадь его несущей поверхности. На рис. 2.8 приведен график, позволяющий определить ширину кольца по заданному его радиусу.

При проектировании кольца было учтено, что рабочая зона кольца находится в интервале $\varphi_k = 0 \div 120^\circ$. При этом кольцо в диапазоне $\varphi_k = 30 \div 90^\circ$ имеет наибольшую кривизну вследствие большой загрузки этой части кольца. В диапазоне $\varphi_k = 0 \div 20^\circ$ задана меньшая кривизна с целью обеспечения более плавного подхода потока воздуха к винту. В диапазоне $\varphi_k = 90 \div 120^\circ$ кривизна уменьшается. На рис. 2.9 приведена рекомендованная схема кольца. Величина ΔP для заданного φ_k зависит только от относительных размеров кольца, а для рассматриваемой системы винт-кольцо абсолютная величина ΔP меняется с изменением V_1 , т. е. увеличение подводимой мощности к винту приводит к увеличению тяги кольца.

Таким образом, при помещении винтомоторной группы в кольцо (кожух) при наличии системы регулирования угла атаки лопастей винта мы имеем возможность регулировать в широких пределах также и величину тяги, создаваемой кольцом.

С увеличением размеров кольца происходит распределение тяги между винтом и кольцом. В пределе при $\eta_k = 0,5$ тяга кольца и винта практически уравнивается. В качестве примера приведем экспериментальные данные из работы [151] (табл. 2.1).

Таблица 2.1
Зависимость относительной тяги винта \bar{T}_k и коэффициента тяги кольца K от величины \bar{r}_k

\bar{r}_k	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
\bar{T}_k	0,890	0,824	0,770	0,718	0,674	0,632	0,571
K	0,190	0,290	0,350	0,405	0,440	0,485	0,490

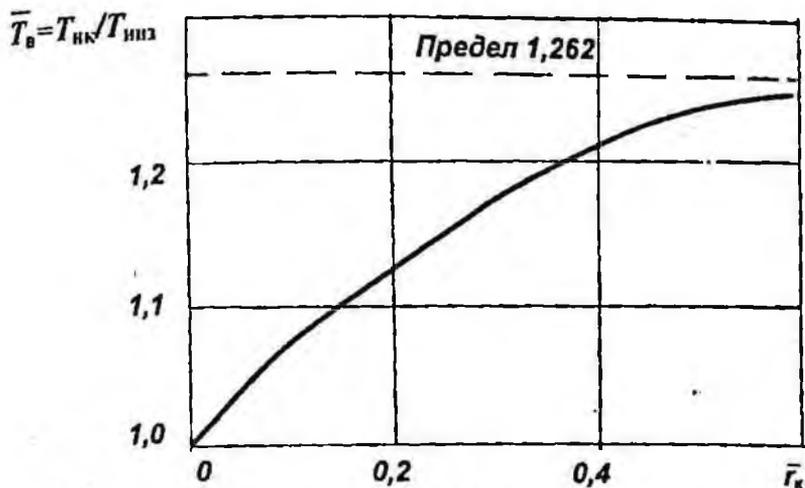


Рис. 2.10. Соотношение $T_{нн}/T_{ннз} = f(r_k)$

Их анализ показывает, что помещение воздушного винта в кольцо приводит к его разгрузке при работе на месте, это увеличивает надежность системы, что весьма важно для винтов АВ-60К двигателя НК-12 при использовании их в качестве роторов карьерных вентиляторов.

На основании совместного решения уравнений идеальной тяги системы винт—кольцо и мощности показано, что развиваемая системой тяга в пределе может быть на 26,2 % выше тяги изолированного винта [151]. На рис. 2.10 показана зависимость $\bar{T}_n = T_{нк}/T_{ннз} = f(\bar{r}_k)$ с учетом этого в проект было заложено значение $\bar{r}_k = r/R_1 = 560/2650 = 0,212$ и соответствующее принятому $\bar{r} = 0,35$. Для заданного значения \bar{r} из графика, приведенного на рис. 2.10, имеем $\bar{T}_n = 1,12T_{ннз}$.

Тяга самого винта $T = \bar{T}_n T_{нк} = 0,708 \cdot 1,12T_{ннз} = 0,79 \cdot T_{ннз}$, где $\bar{T}_n = 0,708$ для $r_k = 0,212$ (см. табл. 2.1). Таким образом, тяга системы в целом возрастает, а винт разгружается на 21 % по сравнению с $T_{ннз}$. В целом система винт—кольцо дает увеличение тяги, облегчает условия эксплуатации винта и снижает концевые потери.

Результаты экспериментальных работ показывают, что коэффициент концевых потерь для обычных винтов равен 0,92—0,94, для винтов в кольце 0,95—0,97, т. е. площадь, участвующая

в создании тяги $F_g = \chi \cdot \pi R^2$, у винтов в кольце больше, чем у изолированных.

Глубина расположения винта в кольце. Установлено, что глубина расположения винта в кольце имеет существенное значение [152, 153]. Под глубиной расположения винта понимается расстояние от передней кромки кольца до плоскости вращения винта. Расположение винта в насадке считается глубоким, если расстояние от кромки насадка свыше 40 % длины последнего [153]. При этом испытывались насадки с длиной хорды до 60 % длины диаметра. Отмечено, что при $\bar{r} = 0,15$ $\bar{T}_n = 0,645$ при глубоком расположении винта и $T_n = 0,77$ при неглубоком тяга, создаваемая системой, одинакова, однако при глубоком расположении винта на долю кольца приходится 35 % от тяги всей системы, при неглубоком — около 23 %.

Положение воздушного винта в насадке также является весьма важным параметром. При расположении винта в задней плоскости сглаживается асимметрия поступающего на винт потока. На основании теоретических и экспериментальных работ рядом авторов сделан вывод о целесообразности помещения винта в насадок на расстоянии 0,4 длины насадка от его переднего края [153]. В нашем случае это расстояние составляет 21,6 % (1600 мм) от длины насадка и выбрано из конструктивных и эксплуатационных соображений.

Из анализа известных работ нельзя сделать вывод об оптимальной длине насадка, так как предельная длина испытанных насадков равняется 1—1,2R винта. Длина насадка вентилятора НК-12КВ выбрана из конструктивных и эксплуатационных соображений и составляет 3,14R (7400 мм).

Для проектирования кольца-насадка (кожух) рекомендованы следующие параметры (см. рис. 2.9):

- 1) зазор между стенкой насадка и концом лопасти $\bar{s} = 0,0213$ ($s = 50$ мм);
- 2) относительный радиус кольца-насадки $\bar{r}_k = 0,212$;
- 3) ширина кольца $\bar{B} = 0,35$;
- 4) длина насадка $\bar{l} = 3,14$;
- 5) расстояние от средней плоскости вращения винтов до передней кромки кольца $\bar{C} = 0,68$, или 26,6 % от длины кожуха-насадка l ($C = 1600$ мм).

Результаты сравнительных промышленных испытаний вентиляторов НК-12КВ (без кожуха) (см. рис. 2.7) и НК-12-

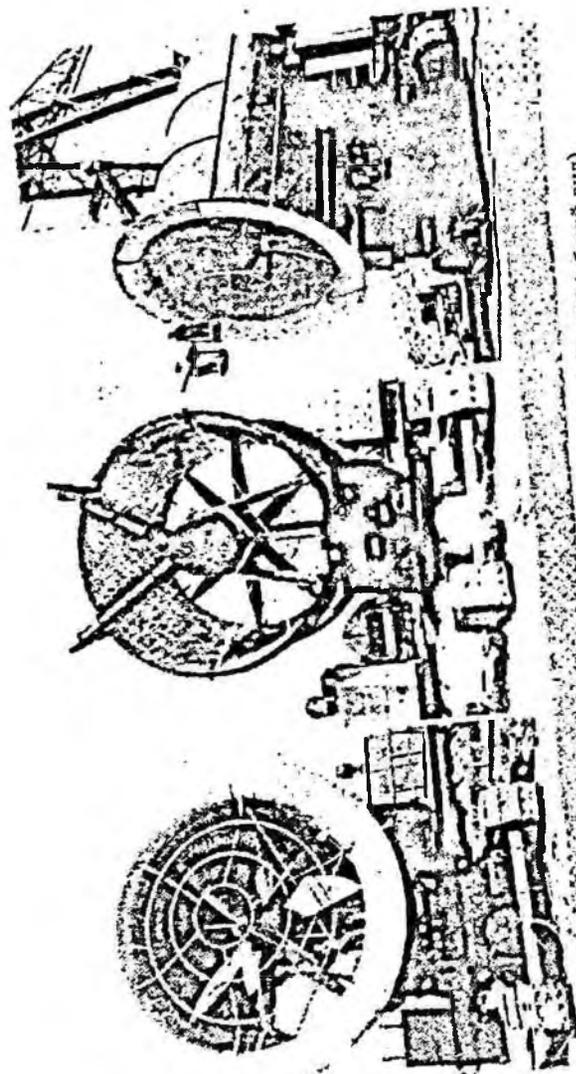


Рис. 2.11. Карьерный вентилятор-ороситель НК-12КВ-1М (общий вид)

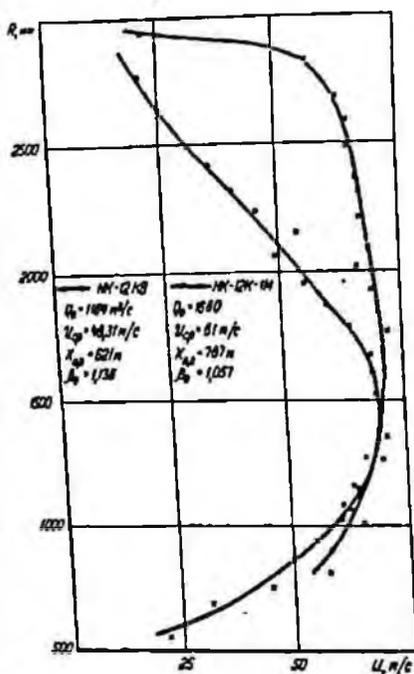


Рис. 2.12. Профили скорости воздуха в начальных сечениях

КВ-1М (с кожухом) (рис. 2.11) показали, что выбранные геометрические параметры кожуха позволили значительно улучшить аэродинамические характеристики струй в начальном сечении. Так, средняя скорость в начальном сечении струи увеличилась с 48 до 61 м/с, расход с 1160 до 1690 м³/с, профиль скорости стал более равномерным (рис. 2.12). По сравнению с идеальным винтом применение профилированного кожуха позволило увеличить к. п. д. до 0,65, т. е. в 1,3 раза.

Исследование способов регулирования неизотермичности струй, создаваемых вентиляторами на базе ТВД

На основании анализа влияния избыточного тепла реактивного выхлопа на степень искривления струй, создаваемых вентиляторными установками на базе ТВД, нами был сделан вывод о необходимости регулирования степени неизотермичности струй. При этом было рассмотрено два способа регулирования: регулирование неизотермичности струй путем вывода выхлопных газов из струй воздушного винта и путем подачи воды в струю реактивного выхлопа с целью снижения ее температуры.

Был принят первый способ регулирования неизотермичности струй, так как применение воды для этой цели связано с большими трудностями подвода ее к установке в условиях открытых горных работ, особенно в зимнее время. Для этого способа регулирования неизотермичности струй, были произведены конструктивная проработка газывыводящего сопла, тепловые расчеты и определение аэродинамических параметров газовой струи.

Передача тепла от выхлопных газов к струе, создаваемой воздушным винтом, через поверхность газоотводящих насадков носит

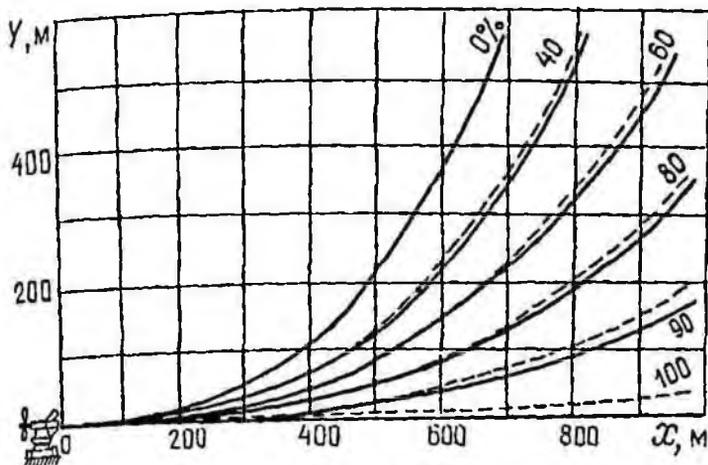


Рис. 2.13. Расчетные кривые оси струи НК-12КВ при различных количествах выведенного газа (%):

— с теплоизоляцией стенок сопла; - - - без теплоизоляции

характер сложного теплообмена. Расчеты, выполненные для вентилятора НК-12КВ по методикам [155,156], показывают, что при использовании газывыводящего сопла с двойными стальными стенками с воздушным промежутком между ними, промежутком, заполненным асбестом, а также сопла с одинарными стенками, величина ΔT , соответственно, равна 0,0206, 0,0430, 0,4415 К. Из анализа влияния типа теплоизоляции газывыводящего сопла на величину ΔT предпочтение следует отдать конструкции сопла с двойными стенками с воздушным промежутком между ними.

Для определения эффективности принятого способа регулирования степени неизотермичности струй, создаваемых вентиляторами на базе ТВД, были произведены тепловые расчеты для вентилятора НК-12КВ при выводе 40, 60, 80, 90, 100 % выхлопных газов для теплоизолированного сопла с двойными стенками и с одинарной стальной стенкой толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м. На основании расчетных данных построены траектории осей струй для каждого случая (рис. 2.13). Расчеты траекторий производились по методике [157]. Установлено, что оси струй, соответствующие случаю вывода газов без теплоизоляции, искривляются несколько больше, чем в случае применения теплоизолированного сопла. Пример приведен в табл. 2.2; из него следует, что при теплоизолированном газывыводящем насадке степень искривления оси струи примерно в 10 раз меньше, чем без теплоизоляции. Сравнивая при этом степень ис-

Таблица 2.2

Расчетные данные для первого и второго типов теплоизоляции при выводе 100 % и без вывода газов из струи вентилятора НК-12КВ

$X, м$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Газы выводятся через теплоизолированный насадок (воздушный промежуток)										
$Y_1, м$	0,005	0,038	0,13	0,37	0,60	1,03	1,64	2,45	3,49	4,78
Газы выводятся через насадок с одинарными стальными стенками										
$Y_2, м$	0,05	0,349	1,33	3,15	6,13	10,72	16,9	25,2	35,9	49,2
Газы не выводятся из струи										
$Y_3, м$	0,308	2,43	8,32	19,7	38,5	66,6	105,5	158,0	224	308

Таблица 2.3

Расходы в газовых струях вентиляторов АИ-20КВ и НК-12КВ

$X, м$	100	200	300	400
Вентилятор НК-12КВ				
$Q, м^3/с$	8730	23100	41700	64050
Вентилятор АИ-20КВ				
$Q, м^3/с$	7670	21500	39800	62200

кривления оси струи при выводе 100 % газов через газоотводящее сопло с одинарной стальной стенкой и без вывода, можно сделать вывод о том, что в целях упрощения конструкции газоотводящего насадка, теплоизолировать его нецелесообразно, т. к. величина y_2 значительно меньше y_3 (примерно в 6 раз) и на расстоянии 600 м от начального сечения струи равна 10,62 м.

Расчеты, выполненные нами по методике М. И. Гримитлина, изложенной в работе [155], для вентиляторов АИ-20КВ и НК-12КВ показывают, что при значении осевой скорости $u_{мг} = 3,06 м/с$ высота выноса газов, соответственно, составляет 680 и 2880 м, т. е. надежный вынос газов будет осуществляться практически из любого карьера. При этом энергию, которой обладают выводимые газы, нельзя считать потерянной, так как газовые струи при своем развитии в карьерном пространстве осуществляют вынос значительного количества загрязненного воздуха. Расходы в газовых струях вентиляторов АИ-20КВ и НК-12КВ, определенные расчетным путем на различных высотах от среза газывыводящих сопел, приведены в табл. 2.3.

Карьерный вентилятор на базе турбовинтового двигателя с нерегулируемым газывыводящим соплом (рис. 2.14) защищен авторским свидетельством на изобретение № 346486. Возмож-

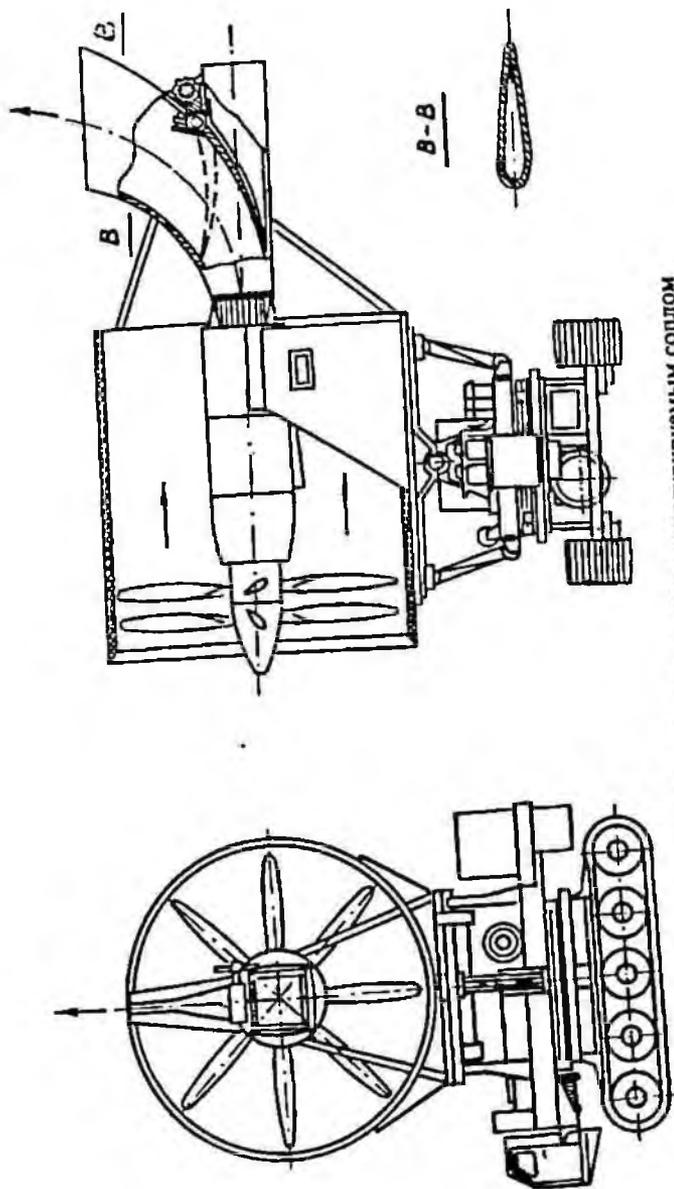


Рис. 2.14. Схема вентилятора с нерегулируемым соплом

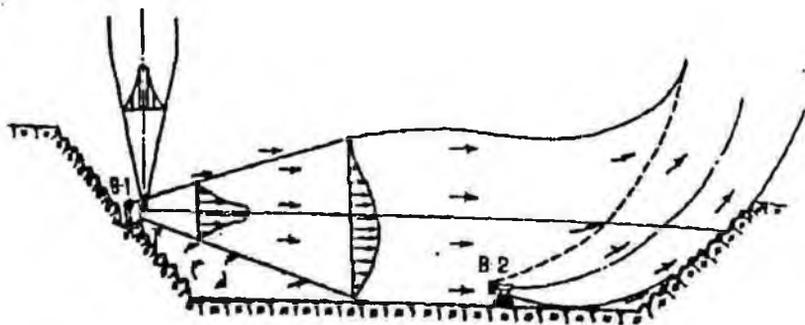


Рис. 2.15. Схема вентиляции карьера с помощью вентилятора, оборудованного газывыводящим соплом

ная схема вентиляции с применением этого вентилятора показана на рис 2.15 [158, 159]. Недостатком этого вентилятора является отсутствие возможности регулирования степени искривления оси струи применительно к различной конфигурации бортов карьера. В модификации вентилятора НК-12КВ, разработанной лабораторией проветривания карьеров ИГД МЧМ СССР совместно с конструкторским отделом Гороблагодатского рудоуправления Нижнетагильского металлургического комбината, этот недостаток устранен путем применения регулируемого газывыводящего сопла [160], имеющего осевой выхлопной патрубком, соосный с двигателем. Количество выводимых газов, а следовательно, и степень неизотермичности струи вентилятора регулируется с помощью заслонки, управляемой дистанционно электромеханическим приводом. С целью упрощения технологии изготовления газывыводящего устройства осевому патрубку придана прямоугольная форма, а для уменьшения габаритных размеров газывыводящее сопло разделено на два патрубка, расположенных под углом 30° к вертикальной оси вентилятора.

С использованием известной методики расчета [161] был рассмотрен характер распространения струй, истекающих из двух сопел, расположенных под углом 30° к вертикальной оси вентилятора. Исходные данные для расчета: скорость истечения газов из сопла с учетом гидравлических потерь 302 м/с, площадь сечения выходного отверстия газоотводящего патрубка $0,31 \text{ м}^2$, приведенный радиус выходного отверстия 0,314 м, среднее значение температуры выхлопных газов 380°C .

Величина критерия Архимеда определяется из выражения

$$Ar_0 = \frac{g r_0 \Delta t_{\text{ср}}}{v_0^2 T_{\text{ср}}} \quad (2.1)$$

где r_0 , $\Delta t_{\text{ср}}$, v_0 и $T_{\text{ср}}$ — соответственно, начальный радиус струи, разность температур газовой струи и окружающего воздуха.

Для нашего случая

$$Ar_0 = \frac{9,8 \cdot 0,314 \cdot 360}{(302)^2 \cdot 293} = 0,00004.$$

Используя выражение [161]

$$\bar{y} = \bar{s} \sin v_0 + 0,02 Ar_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ср}}}} \bar{S}^3 \quad (2.2)$$

строим графики осей струй, истекающих из газовыводящих сопел (рис. 2.16). Для нашего случая уравнение (2.2) принимает вид

$$\bar{y} = 0,8665 + 11,944 \cdot 10^{-7} \cdot \bar{S}^{-3} \quad (2.3)$$

Графики показывают, что оси струй практически совпадают с направлением осей сопел, последнее объясняется малой неизотермичностью струй ($Ar_0 = 0,00004$). Из сказанного следует вывод о целесообразности установки на концах газовыводящих сопел насадков, увеличивающих угол наклона до 90° с целью обеспечения подъема выхлопных газов двигателя на большую высоту в атмосфере карьера или за ее пределами за счет суммирования динамического и термического импульсов струй. Схема рекомендуемого газовыводящего сопла и истекающих из него струй приведена на рис. 2.17, а вентилятора, оборудованного соплом и водораспыляющим контуром, — на рис. 2.18.

2.4. Требования к системе вентиляции карьеров.

Типажный ряд карьерных вентиляторов

Вместе с комплексом средств и организационно-технических мероприятий [91, 162—165], предусматривающих подавление вредных примесей непосредственно у источников их образования, искусственная вентиляция должна обеспечить ликвидацию

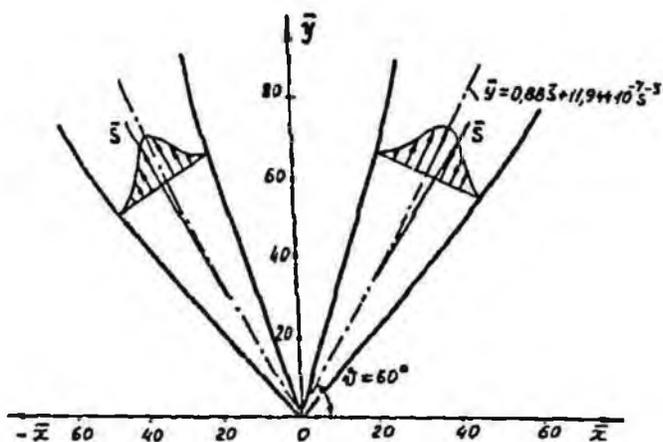


Рис. 2.16. Схема истечения струй из спаренного газывыводящего сопла

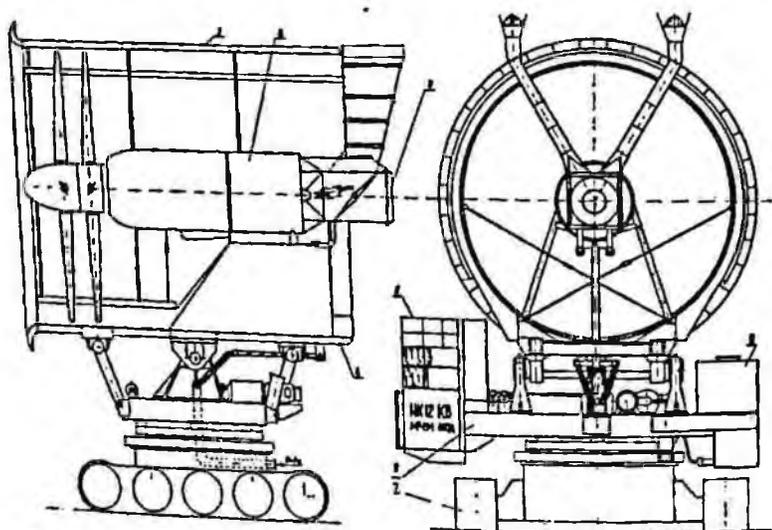


Рис. 2.17. Рекомендуемая схема системы вывода газов из воздушной струи вентилятора НК-12КВ:
 1 — кожух; 2 — турбовинтовой двигатель; 3 — газоподводящее сопло; 4 — наклонная платформа; 5 — кабина машиниста; 6 — поворотная платформа; 7 — головная тележка; 8 — топливный бак

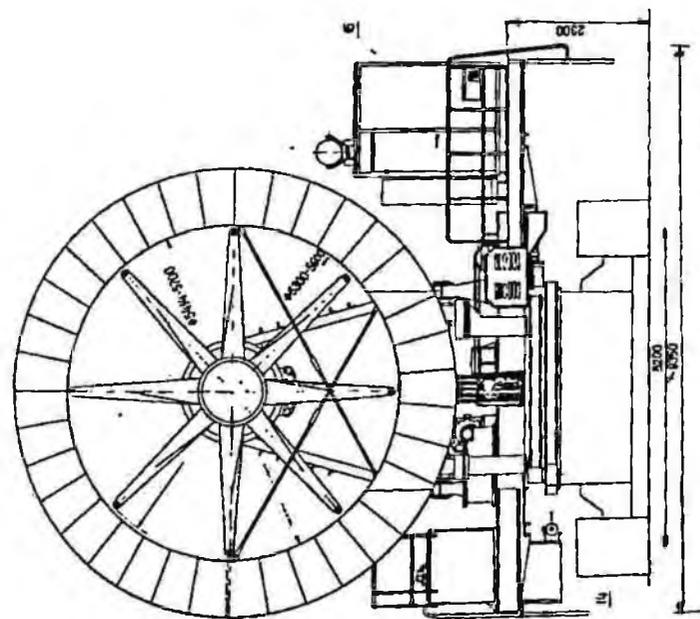
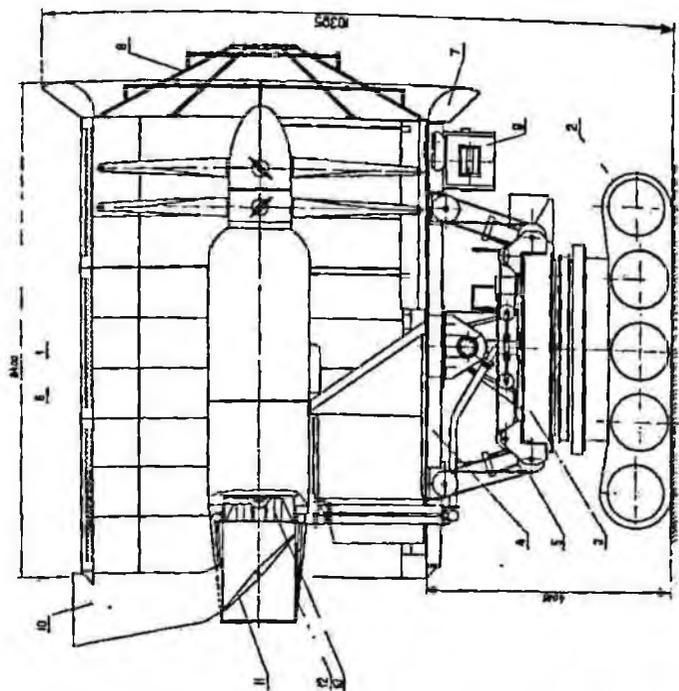


Рис. 2.18. Схема вентилятора НК-12КВ-1М:

- 1 — вентилятор; 2 — ходовая тележка; 3 — инверсионная платформа; 4 — никельная платформа; 5 — система полисасти; 6 — кожух; 7 — воздухозаборник; 8 — поперечнонаправляющие контуры; 9 — концентратор; 10 — газодымоулавливающие вентрубки; 11 — заслонка сошла; 12 — подвижное сошла; 13 — глушитель шума струи; 14 — тепловыделитель; 15 — кабина машиниста оператора

локальных и общих загрязнений атмосферы карьеров в периоды штормов и инверсий. В связи с интенсификацией открытых горных работ применение средств искусственной вентиляции неразрывно связано с необходимостью решения экологической проблемы — охраны окружающей среды путем предотвращения выброса вредных примесей из карьерного пространства в воздушный бассейн. С учетом экономико-экологического фактора и многообразия параметров карьеров к средствам общеобменной искусственной вентиляции должны предъявляться следующие основные требования: максимальная начальная производительность и дальнобойность струй; высокая надежность и экономичность; соответствие гигиенических характеристик санитарным нормам; оснащенность устройствами для активного подавления вредных примесей в атмосфере карьера; широкий диапазон изменения ориентации струй в процессе пылегазоподавления. Для этого могут быть использованы вентиляторы для подавления витающей пыли и теплового кондиционирования воздуха, дегазации и обеспыливания отбитой горной массы, создания защитных покрытий на поверхностях, подверженных ветровой эрозии и др.

Исследованиями Института горного дела [168] доказана целесообразность применения для искусственной вентиляции карьеров авиационных винтов и отработавших летный ресурс турбовинтовых авиадвигателей. Созданные на базе авиационных винтов и ТВД вентиляторы имеют большую производительность и дальнобойность, при этом вес и габаритные размеры установок позволяют обеспечить мобильность на уровне горнотранспортного оборудования.

Высокая надежность и экономичность средств искусственной вентиляции может быть обеспечена за счет применения в конструкции серийных рабочих органов, приводов их, транспортного основания и систем управления, прошедших длительные испытания в различных отраслях народного хозяйства. В наибольшей степени этому требованию удовлетворяют карьерные вентиляторы на базе авиационных ГТД. Длительная эксплуатация и доводка авиадвигателей, позволили практически достичь в отношении надежности и экономичности совершенства [169]. Так, отработавшие ресурс авиадвигатели могут безотказно работать в наземных условиях до 10 000 часов.

Надежность характеризуется способностью устройства безотказно работать в заданных условиях эксплуатации с сохра-

нением заданных параметров на различных режимах в течение установленного периода времени. Она зависит не только от конструктивного совершенства, но и от качества применяемых материалов, совершенства технологии изготовления, соблюдения установленных режимов эксплуатации и т. д. К настоящему времени выполнен значительный объем работ по созданию и промышленной проверке карьерных вентиляторов на базе авиационных газотурбинных двигателей. Прошли междуведомственные испытания карьерные вентиляторы установки АИ-20КВ, НК-12КВ на базе турбовинтовых двигателей [93, 170], на базе турбореактивного двигателя РД-3М-500 [82], разработана техническая документация модульного карьерного вентилятора-оросителя ВОКМ-4-2500 на базе четырех винтомоторных групп самолета АИ-12 и карьерного вентилятора АВК-35 на основе винтомоторной группы вертолета МИ-6 [171, 172].

Выполнены эскизные проработки многодвигательных установок УВ-1 на базе трех турбовинтовых двигателей АИ-20 [173] и на основе двухконтурных двигателей с конвертированными одноконтурными реактивными двигателями [98]. Технические характеристики существующих и предлагаемых к разработке карьерных вентиляторов на базе авиационных воздушных винтов и турбовинтовых двигателей приведены в табл. 2.4, а общие виды — на рис. 2.19—2.21. Следует отметить, что многодвигательные вентиляторные установки на основе двухконтурных двигателей с утилизацией газов первого контура (“Торнадо”) уступают по экономичности установкам УВУ-1. Карьерный вентилятор УВ-1 по удельным и аэродинамическим характеристикам близок к вентилятору НК-12КВ-1М, но, как и многодвигательные установки типа “Торнадо”, имеет более низкий коэффициент надежности [174]:

$$R_{\Sigma} = R^n, \quad (2.4)$$

где $R < 1$ — надежность одного двигателя, входящего в установку.

Коэффициент затрат на техническое обслуживание и ремонт карьерных вентиляторов прямо пропорционален количеству авиадвигателей, входящих в один агрегат.

$$k_{\text{т.о.р.}} = \frac{n \cdot C_{\text{т.о.р.}}}{C_n}, \quad (2.5)$$

Характеристика карьер

Показатель	УМП-1А (Б)	ВОКМ-1(2)-300	УМП-14	УМП-21
Двигатель воздуха	Авиационные винты		Несущие вертолетные	
Диаметр винта, м	3,6	3,6 (2×2,5)	14,5	21
Тип привода	Дизельный	Дизель-электрич.	Электрический	
Мощность привода, кВт	368	600	320	1000
Средняя скорость воздуха в начальном сечении струи, м/с	24	24	7,2	8,15
Начальный расход воздуха, м ³ /с	240	300	1050	2520
Дальность (м) струи в равновесной атмосфере до сечения со средней скоростью 0,6 м/с	180	250	200	250
Высота подъема (м) вертикальной струи в устойчивой атмосфере при температурном градиенте $\gamma = (+0,5) \div (-5)$	—	—	290—150	374—200
Базовое транспортное основание	БелАЗ-548	БелАЗ-7519	Ходовая тележка бурового станка	
Назначение	Универсальные установки местного проветривания		Вентиляторы для создания вертикальных и наклонных струй	
Состояние работ	Серийное производство	Рабочие чертежи	Опытные образцы	

где n — число обслуживаемых двигателей;

$C_{т.о.р.}$ — суммарные затраты на обслуживание и ремонт одного двигателя за рассматриваемый период эксплуатации;

$C_{н.}$ — первоначальная стоимость машины.

Положительной стороной многодвигательных установок является возможность обеспечения оптимального удельного расхода топлива при изменении режимов работы вентилятора.

Таблица 2.4

ных вентиляторов

АВК-35Э	ВК-2000	АИ-20КВ	НК-12КВ	ВОКМ-4-2500
винты серии "Ми" и "Ка"		Турбовинтовые двигатели		
35	15,74	4,5	5,6	9
Газотурбин. электр.	Дизель-электр.	Газотурбинный		
2x4050/8000	600	2550—3000	9400—11000	10200—12050
12,6	10,3	40	61	40
11000—12000	2000	640	1680	2500
640	230	320	520	600
Ходовая тележка ЭКГ-8И	БелАЗ-7519	Шасси автомоб. КраЗ спец. изгот.	Ходовая тележка ЭКГ-4,6	Ходовая тележка ЭКГ-8И
Вентиляторы-воздухоочистители для создания вертикальных и наклонных струй		Вентиляторы-оросители — генераторы осадков		
Рабочие чертежи	Эскизный проект	Промышленные образцы		Рабочие чертежи

В гигиеническом отношении наиболее приемлемым для привода рабочего органа вентиляторов является электрический. Однако он имеет существенные недостатки: большие габариты и вес, потребность в большом резерве установленной мощности. Например, вентилятор ПВУ-6 со специально спроектированным рабочим органом размещается на двух железнодорожных платформах [171]. Вентилятор имеет производительность $Q_0 = 200 \text{ м}^3/\text{с}$, диаметр рабочего органа $d_0 = 1,8 \text{ м}$, мощность привода $N = 2000 \text{ кВт}$. Вследствие размещения вентилятора на желез-

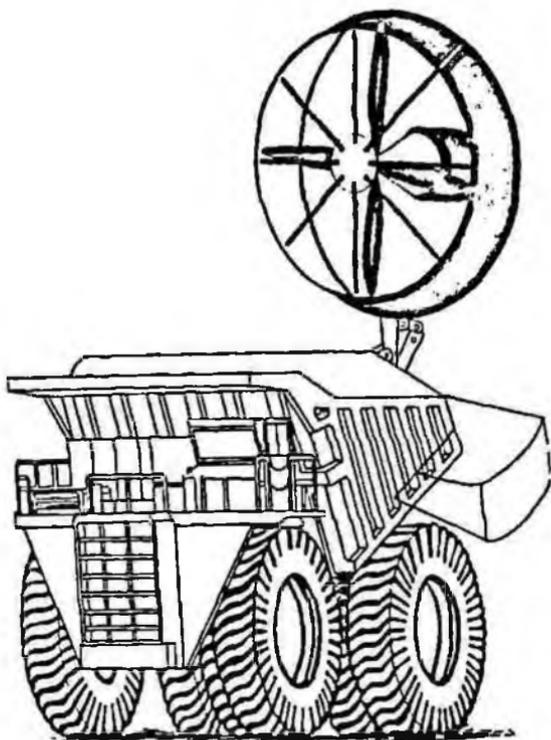


Рис. 2.19. Универсальный вентилятор-ороситель-пеногенератор ВОК-300П

нодорожных платформах при его эксплуатации возникли трудности в практической реализации оптимальных схем проветривания. Подключение вентиляторов к высоковольтной сети сопряжено с дополнительными трудностями. По нашему мнению, до создания компактного и достаточно мощного электрического привода для карьерных вентиляторов большой производительности целесообразно пойти по пути улучшения санитарно-гигиенических характеристик авиационных ГТД. В частности, снижение уровня шума и токсичности выхлопа будут способствовать размещению двигателя и винта в звукоизолированном кожухе, распыление жидкости в реактивной струе и в зоне работы винта, а также выбор рациональных режимов работы средств искусственной вентиляции [112, 175—177].

С целью предотвращения выбросов вредных примесей и охраны окружающей среды средства искусственной вентиляции

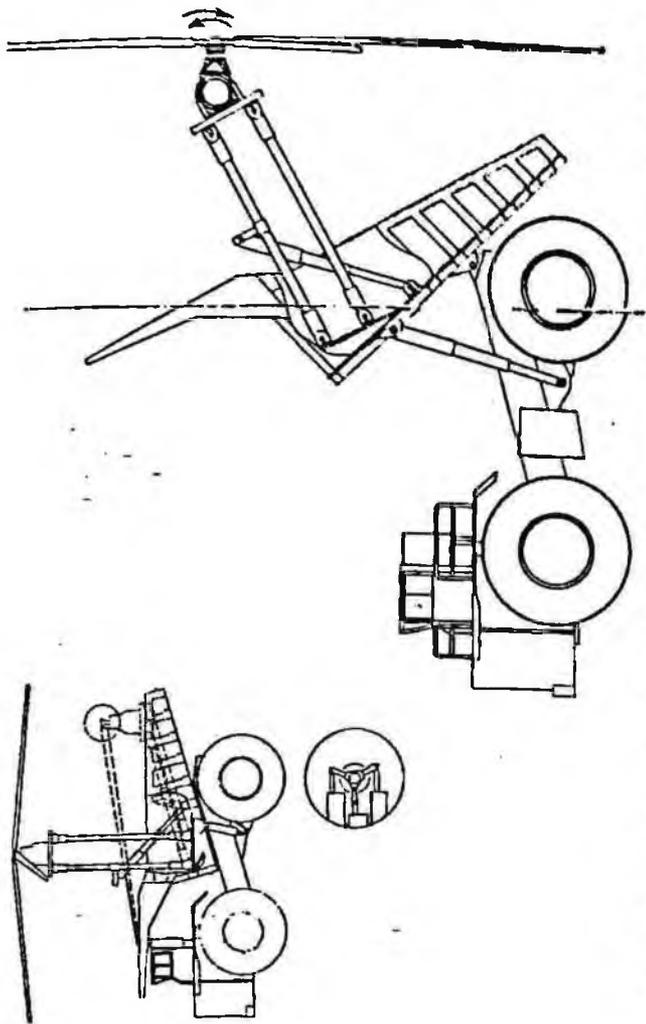


Рис. 2.20. Карьерный вентилятор ВК-2000: а — кинематическая схема; б — рабочее положение при создании горизонтальных и наклонных струй

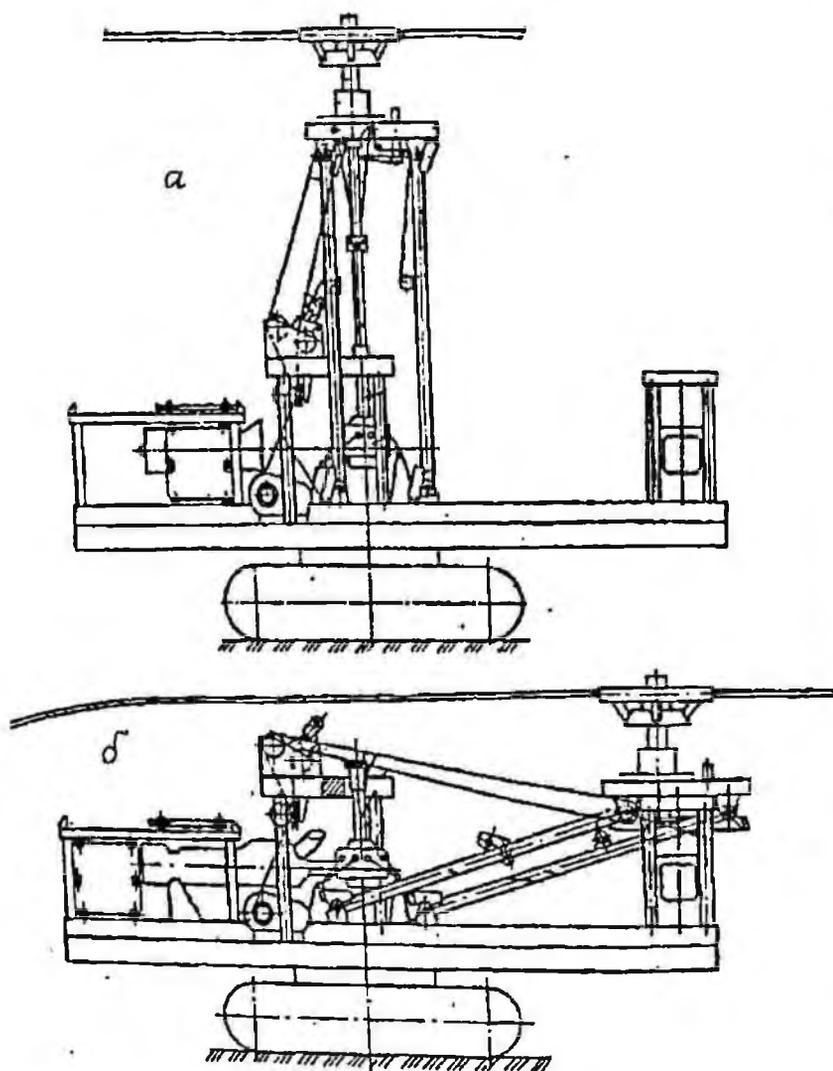


Рис. 2.21. Карьерный вентилятор АВК-35:
 а — рабочее положение; б — транспортное положение

должны быть оборудованы устройствами, обеспечивающими эффективное подавление вредностей в атмосфере карьеров при прекращении работы горно-транспортного оборудования. К таким устройствам относятся водораспыляющие сопла, устанавливаемые у среза реактивного сопла вентиляторов. В качестве генераторов воздушно-водяных струй, а в зимнее время — снега, могут быть использованы как ТВД, так и ТРД. Существенному повышению эффективности процессов пылегазоподавления может способствовать, по нашему мнению, омагничивание пыли и введение химвагентов, обеспечивающих образование ядер конденсации [178].

Необходимость выполнения одного из основных требований, предъявляемых к средствам искусственной вентиляции, — широкого диапазона изменения ориентации турбулентных струй в процессе проветривания, — базируется на большом объеме экспериментальных исследований [90, 179].

Для повышения эффективности процессов искусственной вентиляции карьерные вентиляторы должны быть оборудованы системами поворота струй в горизонтальной плоскости и наклона — в вертикальной. Применение этих систем позволяет увеличить объем обрабатываемой с помощью одного вентилятора зоны как при разрушении инверсии, так и кондиционировании воздуха. Благодаря этому к вентиляторам общего проветривания требования по мобильности могут быть менее жесткими.

На основании выполненных ранее исследований [175], а также с учетом опыта промышленных испытаний различных средств вентиляции и пылегазоподавления (АИ-20КВ, НК-12КВ и др.), предлагаем уточненный типовый ряд карьерных вентиляторов:

— мобильные вентиляторы-оросители многоцелевого назначения с дизельным и дизель-электрическим приводом;

— мобильные вентиляторы с дизель-электрическим приводом на базе вертолетных винтов со складывающимися лопастями (вертолеты серии “Ка”) для проветривания воронкообразных карьеров и застойных зон восходящими вертикальными и наклонными струями;

— передвижные вентиляторы большой производительности на базе несущих вертолетных винтов с электрическим или газотурбинным приводом;

— передвижные вентиляторы-оросители на базе турбовинтовых двигателей. При этом третья и четвертая группы карьер-

ных вентиляторов могут быть использованы для создания систем вентиляции и пылегазоподавления и реализации комбинированных схем проветривания карьеров.

Разработка карьерных вентиляторов (ВОК-300П, ВК-2000, АВК-35(Э), НК-12КВ, ВОКМ-4-2500) позволяет уточнить типажный ряд, приведенный в работе [175] и адаптировать его к современному состоянию развития техники при ведении открытых горных работ. Суть этого вывода заключается в следующем: на большинстве крупных карьеров парк автосамосвалов БелАЗ-548 (база серийного вентилятора УМП-1) заменен на парк автосамосвалов с дизель-электрической трансмиссией БелАЗ-7519, что позволяет в условия РМЗ горнодобывающих предприятий изготавливать более мощные универсальные вентиляторы-оросители-пеногенераторы ВОК-300П (см. рис. 2.19), предназначенные для местного проветривания застойных зон глубоких карьеров, подавления пыли и растворимых газов, орошения взорванной горной массы, поливки полотна автодорог и обработки подготовленных к взрыву блоков с помощью пены. В качестве рабочего колеса вентилятора используется 4-лопастной воздушный винт. Для превращения воздушного винта из тянущего в толкающий его лопасти развернуты на 180° и изменено направление вращения. Установка и крепление винта на приводном валу полностью соответствует его установке на самолете Ан-2. Грузовая платформа автосамосвала переоборудована в цистерну для воды, на которой установлен насос, бак для пенообразователя, гидроуправляемый ствол, гидромонитор, поливное устройство. Вентилятор устанавливается на стреле, подъем и опускание которой осуществляется с помощью гидроцилиндра; состоит из рабочего колеса, гондолы для приводного двигателя, опоры с кронштейнами, служащими опорами для крепления кожуха. Кожух с размещенными внутри него лопатками образует направляющий аппарат для воздушной струи. Поворот вентилятора в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществляется также с помощью гидроцилиндров. По оси вращения винта установлен коллектор со сменными форсунками для распыления воды в воздушной струе. Для обеспечения надежной работы вентилятора ВОК-300П в зимнее время предусмотрена система подогрева водоподающего коллектора. В транспортном положении вентилятор размещается в кожухе, защищающем его от попадания пыли, грязи в механических повреждениях. Управление механизмами

вентилятора ВОК-300П дистанционное, осуществляется с пульта, расположенного в кабине водителя.

Основная характеристика ВОК-300П

Транспортное основание.....	БелАЗ-7519
Количество модулей.....	2
Начальный расход воздуха, м ³ /с.....	300
Дальность переноса водяных капель, м:	
воздушной струей.....	150
гидромонитором.....	80
Расход воды гидромонитором, м ³ /мин.....	1,8
Дальнобойность воздушной струи, м.....	400
Емкость бака для воды для пенообразователя, м ³	3,3
Производительность по пене, м ³ /мин.....	350
Кратность пены.....	250—350
Стойкость пены, мин.....	30—40
Высота установки, м:	
в рабочем положении.....	7,5
в транспортном положении.....	5,0

Как показал опыт промышленных испытаний карьерных вентиляторов на базе вертолетных винтов УМП-14, УМП-21 (новое название ВУ-14, ВУ-21), разработанных совместно ИГД УрО РАН (бывший ИГД МЧМ СССР) и институтом НИПИГор-маш, основным их недостатком явилась малая мобильность, то есть при каждом перемещении вентилятора необходимо снимать лопасти воздушных винтов (довольно сложная и трудоемкая операция), а при почти ежедневном производстве взрывных работ практически исключилась возможность оперативного их применения в зонах карьера, где требовалась вентиляция. Тогда было принято решение о создании высокомобильного вентилятора ВК-2000 (см. рис. 2.20) на базе воздушного винта со складывающимися лопастями вертолета Ка-26. В качестве базового транспортного основания был также выбран автосамосвал БелАЗ-7519, имеющий мощную дизель-генераторную установку и гидравлическую систему для приведения вентилятора в рабочее и транспортное положения. К конструктивным особенностям вентилятора следует отнести то, что этот вентилятор может создавать струи от горизонтальной до вертикальной, а при автономном источнике питания — оперативно решать задачи вентиляции локально загрязненных зон в карьере.

Основная характеристика ВК-2000

Транспортное основание.....	БелАЗ-7519
Диаметр винта, м.....	15,7
Мощность привода, кВт.....	600
Начальная скорость струи, м.....	10,3
Начальный расход воздуха, м ³ /с.....	2000

Высота подъема струи, м.....	300
Угол наклона струи к горизонту, град	0—90
Высота установки, м:	
в рабочем положении	10,0
в транспортном положении	6,4

Для проветривания воронкообразных карьеров ИГД УрО РАН с участием Московского вертолетного конструкторского бюро им. М. Л. Миля, института Уралгипроруда разработана техническая документация карьерного вентилятора АВК-35 на базе сплывной установки вертолета Ми-6 (см. рис. 2.21) (а. с. 1652604). Вентилятор можно использовать в сочетании с установкой, создающей горизонтальные и слабо наклонные струи (например, НК-12КВ-1М) для проветривания карьеров, имеющих значительные размеры в плане (карьеры ССГПО, комбината Ураласбест и другие). Техническая характеристика вентилятора приведена в табл. 2.4. Вентилятор состоит из несущего винта с системой управления шагом винта, обеспечивающей его работу при отрицательных углах; складывающихся трансмиссионного вала и мачты; двух приводных газотурбинных двигателей Д-25В; редуктора для передачи крутящего момента от двигателей к винту; систем обеспечения работы и контроля двигателей и управления шагом винта. В качестве основания использована ходовая тележка экскаватора ЭКГ-8И.

Учитывая современные требования экологии, вентиляторы на базе вертолетных винтов могут быть использованы в системах очистки воздуха. Один из вариантов системы воздухоочистки, реализация которой может быть осуществлена как в карьере, так и на заводской площадке, показан на рис. 2.22. Очистка может осуществляться путем прокачки воздуха, подсасываемого воздушным винтом, через орошаемый водой или химрастворами экран из сетки.

После списания самолетов Ту-114 все авиадвигатели НК-12МВ были переданы из МГА нефтегазодобывающему комплексу и нашли широкое применение в качестве привода газодувки газоперекачивающих станций.

У предприятий, связанных с военно-промышленным комплексом, имеется возможность создания опытно-промышленных образцов установок НК-12КВ. Однако из-за низких темпов конверсии и высокой стоимости перспективы приобретения авиадвигателей НК-12МВ и комплектующих у министерства обороны предприятиями народного хозяйства практически нет. В связи с этим возникла необходимость разработки нового типа

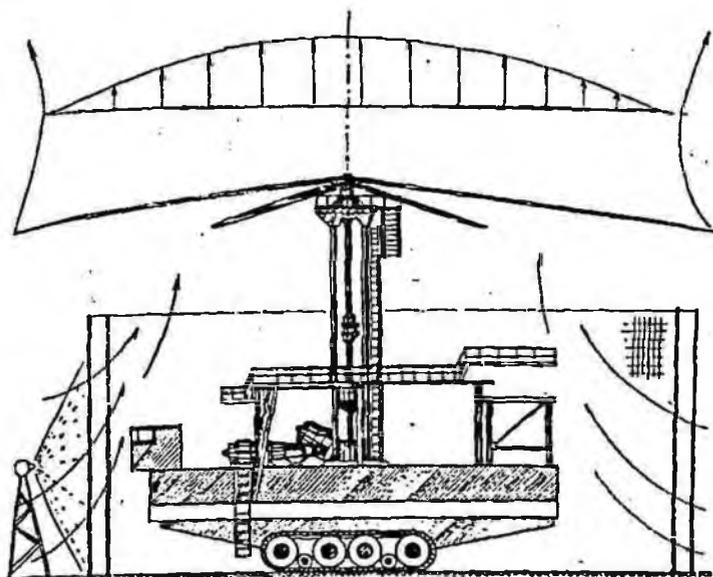


Рис. 2.22. Очистка воздуха с помощью карьерного вентилятора АВК-35

вентиляторов-оросителей с параметрами струй, близкими НК-12КВ-1М. Массовое списание в ближайшее время самолетов Ан-12, а также положительный опыт эксплуатации карьерных вентиляторов-оросителей АИ-20КВ [93] позволят реализовать идею создания мощных модульных вентиляторов на базе винтовой группы (ВМГ) этого самолета. Причем в зависимости от параметров карьеров можно создавать установки из 2—4 модулей (рис. 2.23—2.24). Для уменьшения габаритов и металлоемкости установок, а также с целью предотвращения ухудшения аэродинамических параметров струй и акустических характеристик целесообразно размещать ВМГ в насадках (кожухах) на небольшом расстоянии.

При компактном расположении модулей входные коллекторы насадков симметрично расположенных модулей необходимо профилировать с отклонением плоскости входа воздуха в коллектор от плоскости вращения винта на угол $\alpha \approx 20^\circ$. Отклонение плоскости входа коллектора позволяет обеспечить не только компактность модулей и создаваемого потока струй, но и предотвратить ухудшение условий подтекания воздуха к винтам, а следовательно, и уменьшение суммарного расхода воздуха. При компактном расположении модулей $L \approx D$, отсутствие входных

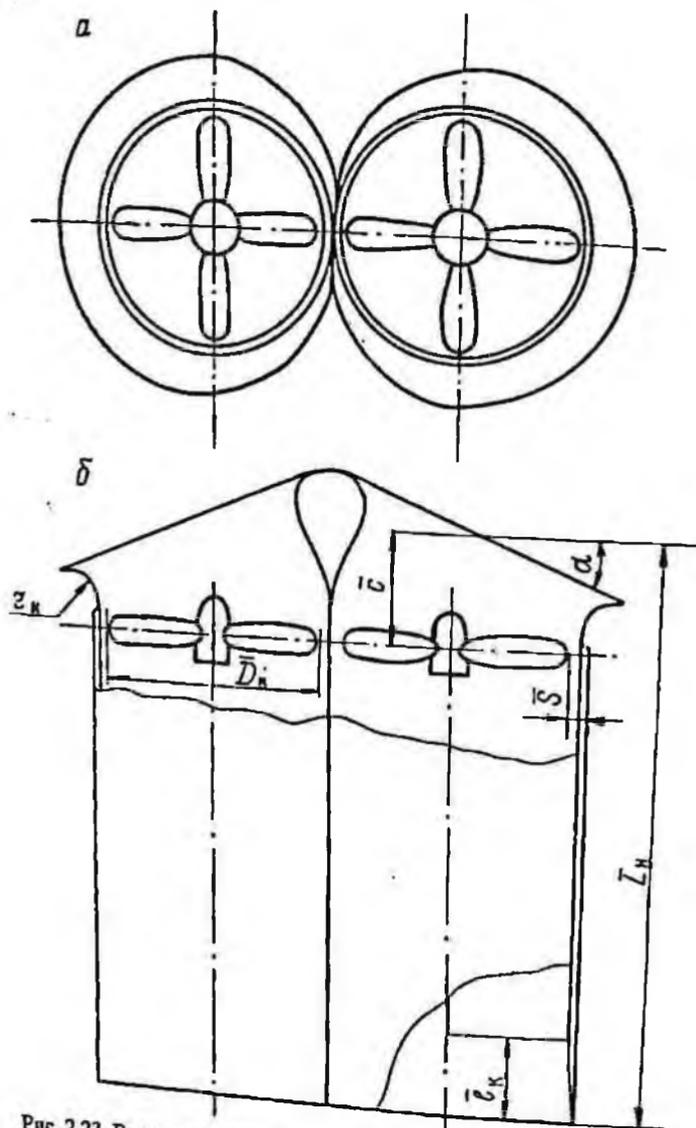
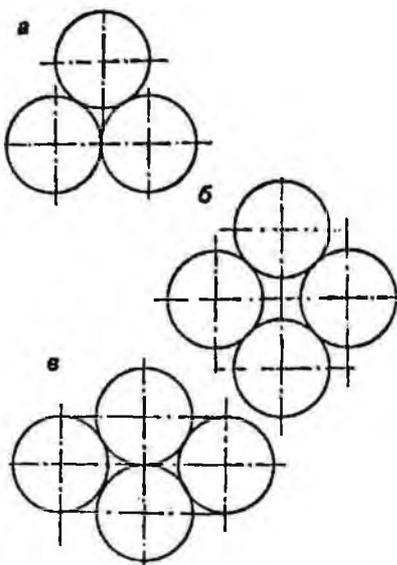


Рис. 2.23. Вариант компоновки формирователя потока вентилятора из двух двигателей в кожухах (модулей):
 а — вид сверху; б — вид сбоку

Рис. 2.24. Варианты компоновки формирувателя потока из трех и четырех модулей

коллекторов не позволило бы снизить нагрузки на винты за счет перераспределения тяги системы винт—насадок от винта на насадок, а также привело бы к возникновению зоны аэродинамической тени на входе в насадки и уменьшению суммарного расхода воздуха. При наличии входных коллекторов, но при отклонении их плоскости входа на угол $\alpha < 20^\circ$ зона аэродинамической тени, а следовательно, и уменьшение суммарного расхода воздуха сохраняется. При $\alpha > 20^\circ$ может произойти замыкание линий тока выходящих струй на вход коллектора. Обратная циркуляция вызовет уменьшение суммарного расхода воздуха установок.

На основании расчетов установлено, что близкие к вентилятору НК-12КВ-1М параметры струй можно обеспечить установкой, состоящей из 4 модулей с турбовинтовыми двигателями АИ-20. Исходя из целесообразности использования в установке большего количества серийно выпускаемых изделий и агрегатов, 4 модуля можно разместить на поворотной платформе и ходовой тележке экскаватора ЭКГ-8И. При расположении модулей по схеме, показанной на рис. 2.24, вследствие смещения пакета от оси вращения платформы ЭКГ-8И при работе авиадвигателей возникает постоянный крутящий момент в горизонтальной плоскости. Для размещения на платформе под модулями всех систем, обслуживающих ВМГ, и обеспечения угла наклона струй в вертикальной плоскости ($\beta = \pm 20^\circ$) возникает необходимость увеличения высоты стоек фермы пакета модулей. Вследствие этого при работе возрастает крутящий момент в вертикальной плоскости, ухудшается устойчивость установки. Этих недостатков можно избежать при размещении модулей по схеме 2.24, в. Кроме того, по сравнению со схемой 2.24, а, схема 2.24, в позволяет уменьшить срыв пыли с поверхности уступа: за счет



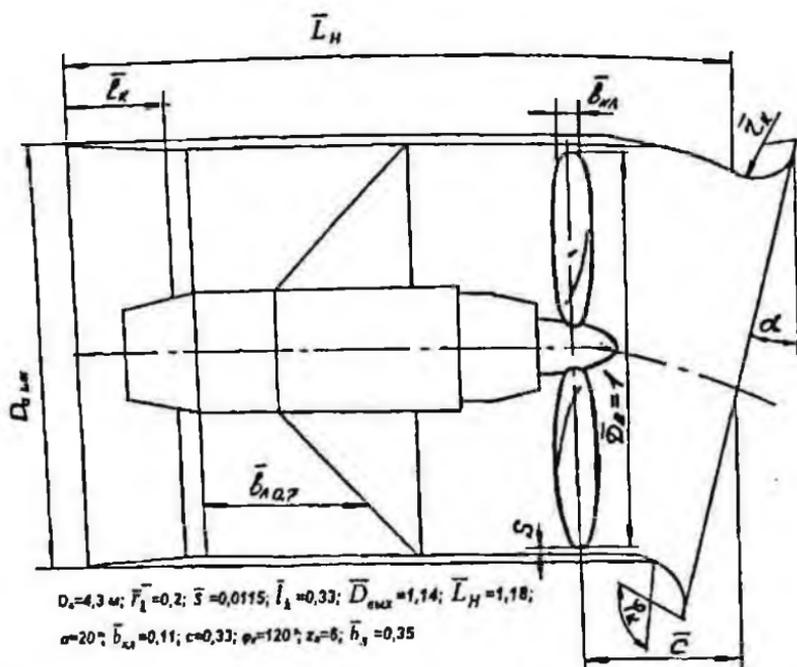


Рис. 2.25. Общий вид и параметры модуля вентилятора ВОКМ-4-2500 на базе ТВД АИ-20

размещения внизу только одного двигателя объем зоны разряжения перед установкой в 2 раза меньше. Профили насадков модулей были разработаны так же, как и для вентилятора НК-12КВ-1М, на основании анализа экспериментальных исследований, изложенных в ранее цитировавшихся работах [77, 78, 82, 149, 152]. Общий вид и параметры модуля вентилятора ВОКМ-4-2500 показан на рис. 2.25. В отличие от насадка (кожуха) карьерного вентилятора НК-12КВ-1М, насадок модулей карьерного вентилятора ВОКМ-4-2500 оборудован спрямляющими аппаратами.

В вентиляторостроении считается целесообразным использование СА, если коэффициент давления $H \leq 0,05$. Однако исследованиями С. Е. Бутакова [182] доказано, что применение СА при $H = 0,025$ в устройствах, создающих свободную турбулентную струю, позволяет существенно улучшить ее аэродинамические качества, в частности, дальность. Количество лопаток СА, как и количество лопаток рабочего колеса (РК) вентилято-

ра, выбирается в настоящее время из конструктивных соображений [150]. К примеру, В. С. Пак [180] рекомендует принимать количество лопаток СА на одну меньше или больше, чем количество лопаток у РК. При этом ширина лопаток СА должна быть больше, чем у РК. Это обусловлено тем, что в СА скорость потока меньше, чем в РК, а следовательно, при изменении режима работы вентилятора (уменьшение скорости вращения) режим, сопровождающийся увеличением потерь и уменьшением к. п. д. [180, 181] в СА наступит раньше, чем в РК. Исследованиями А. И. Павлова на моделях воздушных винтов [177] установлено, что применение спрямляющего аппарата за винтом почти полностью устраняет разряжение на оси струи. Это способствует уменьшению эжекции воздуха из окружающей среды в струю и увеличивает ее дальность. Для четырехлопастных за счет СА осевая скорость может быть увеличена на 45 % по сравнению с изолированным винтом. Оптимальная ширина лопасти должна быть $b_n = 0,5D_n$, а количество лопаток $Z_n = 6$.

По конструктивным соображениям для модуля АИ-20 принята трапециевидная форма лопаток СА. Ширина лопатки на $0,7R_n$ составляет $0,7R$, что позволит увеличить осевую скорость на 40 % по сравнению с изолированным винтом. Шесть лопаток СА используются в качестве силовых элементов крепления ВМГ к кожуху и для прокладки коммуникаций к двигателю.

Экспериментально установлено [149], что при работе системы винт—насадок можно добиться увеличения тяги на 5 %, если относительная величина хорды конца лопасти $b = b/D_n = 0,11$. Такое значение $b_{кл}$ у единичного модуля АИ-20 обеспечивается путем обрезки концов лопасти на 0,1 м.

Рабочим органом модуля вентилятора являются воздушные винты АВ-68И изменяемого шага. Привод рабочего органа — турбовинтовые двигатели АИ-20 самолета Ан-12. Общий вид вентилятора представлен на рис. 2.26—2.27, техническая характеристика вентилятора приведена в табл. 2.4.

2.5. Анализ и разработка систем контроля параметров атмосферы карьеров

Поскольку карьеры являются мощными источниками выделения вредных примесей, необходимость применения систем контроля параметров их атмосферы является актуальной задачей. Внедрение мощных средств пылегазоподавления обусловило целесообразность разработки автоматизированных систем,

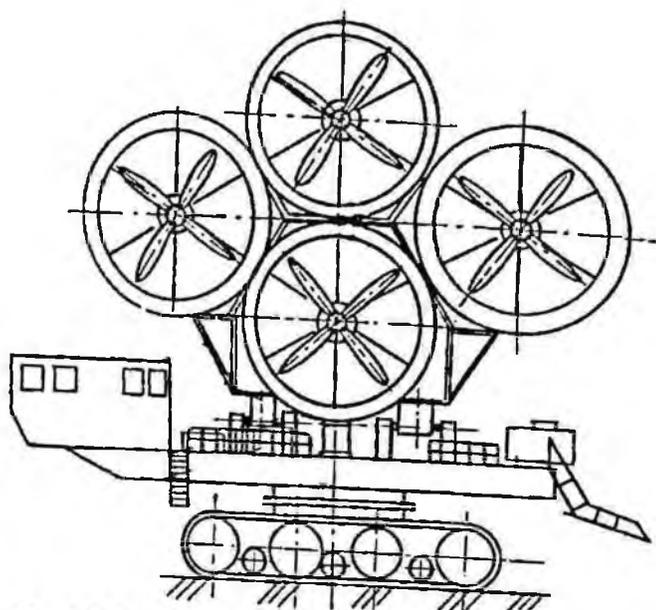


Рис. 2.26. Общий вид вентилятора ВОКМ-4-2500 (спереди)

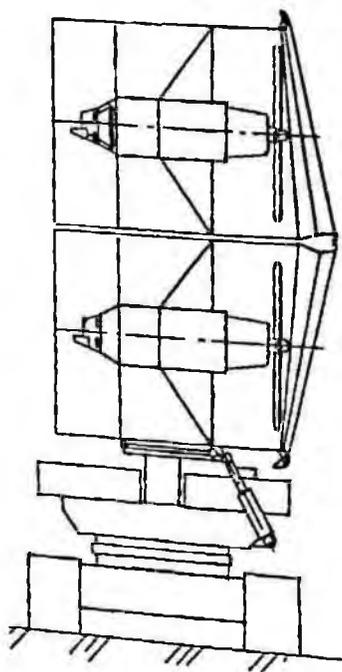


Рис. 2.27. Общий вид вентилятора ВОКМ-4-2500 (сбоку)

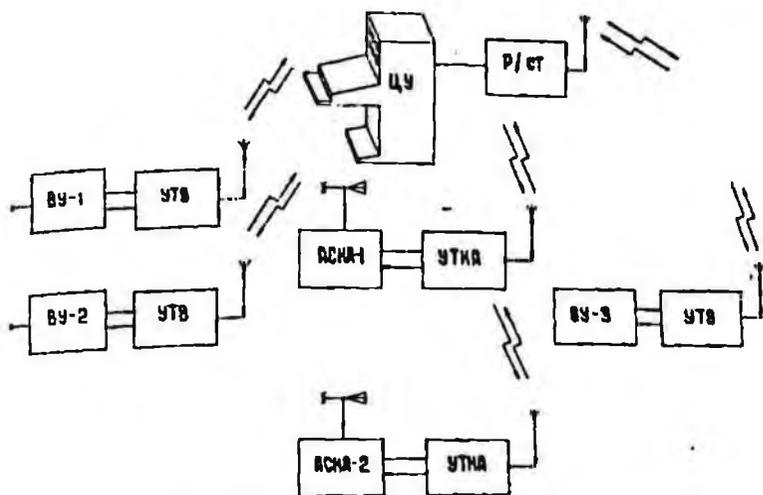


Рис. 2.28. Структурная схема системы "Диспетчер-1":

ЦУ — центральное устройство; ВУ — вентиляционная установка; УТВ — устройство телеуправления вентилятором; АСКА — автоматическая станция контроля атмосферы; УТКА — устройство телеконтроля атмосферы

обеспечивающих не только контроль за уровнем загрязнения атмосферы, но и дистанционное управление вентиляторами-оросителями.

ИГД МЧМ СССР совместно с ПО "Уралэнергочерметавтоматика" была разработана система "Диспетчер-1" [183], позволяющая осуществить дистанционный запуск, управление и контроль за работой карьерных вентиляторов с одного диспетчерского пункта, синхронный поворот и наклон струи вентилятора по заданной программе, а также телеметрический контроль содержания вредных примесей и метеопараметров атмосферы карьеров (рис. 2.28). В систему может входить до пяти вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М, до трех автоматических станций контроля параметров атмосферы карьера и диспетчерский пункт. На ДП устанавливается устройство системы "Диспетчер-1", на вентиляторе — устройство телеуправления вентиляторами, а на автоматической станции контроля параметров атмосферы — устройство телеконтроля атмосферы. Весь комплекс, кроме диспетчерского пункта, располагается в карьере: АСКА — на дне карьера и промежуточных горизонтах, вентиляторы НК-12КВ-1М (или электровентиляторы) — в соответствии с рекомендованной схемой вентиляции.

В системе обеспечена периодическая, с минимальным интервалом, передача данных с ВУ на ДП, а также периодическая передача с АСКА на ДП. Для этого в системе предусмотрен автоматический поочередный опрос КП с ДП. При этом используется одна радиочастота, и как на КП, так и на ДП требуется по одной радиостанции. Частота выбирается в диапазоне, выделенном для производственной радиосвязи. В системе могут быть применены стандартные радиостанции. Опрос КП производится путем передачи соответствующего адреса в двоичном коде. Командная информация с ЦУ на КП, а также вся информация с КП на ЦУ передается в двоичном последовательном коде с синхроимпульсом. Для УТВ приняты следующие контролируемые параметры: температура выхлопных газов, температура двигателя, давление масла и др. С УТКА передаются сведения о содержании окислов азота и окиси углерода, о скорости и направлении ветра, о температуре и влажности воздуха. При необходимости может сообщаться уровень запыленности воздуха. При восьми КП время цикла, т. е. время опроса всех КП, составляет 3,36 с. Испытания макета системы в карьере показали, что прохождение ложных команд и искажения передаваемых параметров не наблюдались.

ПО "Уралчерметавтоматика" изготовлен головной образец системы "Диспетчер-1", включающий ЦУ, три УТВ и два УТКА. Промышленные испытания вентиляционно-телеметрического комплекса, в который входят три вентилятора НК-12КВ-1М и головной образец системы "Диспетчер-1", проведены на карьере НГМК в 1985—1988 гг. На основе опыта эксплуатации системы "Диспетчер-1" разработана более совершенная система контроля параметров атмосферы карьера и управления средствами пылегазоподавления "Диспетчер-2", позволяющая производить дистанционный запуск и управление вентиляторами с непрерывным контролем их состояния. Подсистема передачи данных с газоаналитических станций позволяет вести оперативный контроль за состоянием атмосферы в карьере, содержанием вредных ингредиентов, определять необходимость включения местной или общеобменной вентиляции, эффективность ее работы и момент отключения вентиляции.

Канал передачи данных с центрального устройства системы на ЭВМ и обратно позволяет периодически фиксировать при помощи печатающего устройства ЭВМ содержание вредных примесей в атмосфере и метеобстановку в карьере, а также решать задачу прогнозирования повышения "загазованности" карьера

Таблица 2.5

Технические данные газоаналитической станции СТСА

Параметр	Ед. измерения	Значение параметра
Диапазон измерений:		
концентрации в воздухе оксида углерода (СО)	мг/м ³	0—100
концентрация в воздухе диоксида азота	мг/м ³	0—50
скорости ветра	м/с	1,5—50
направления ветра	град	0—360
температуры воздуха	°С	-55 ÷ +45
относительной влажности воздуха	%	30—100
Абсолютная погрешность измерений, не более:		
концентрации СО	мг/м ³	±10
концентрации NO _x	мг/м ³	±5
скорости ветра	м/с	±(0,5—0,05)
направления ветра	град	±10
температуры воздуха	°С	±0,8
относительной влажности воздуха	%	±7
Питание от сети трехфазного тока напряжением 380 В, 50 Гц, потребляемая мощность, не более	кВт	3
Габариты		
корпуса станции	мм	2000×2000×2000
высоты станции с поднятой мачтой	мм	4000
Масса	кг	2000
Стоимость станция (в ценах 1990 г.)	тыс. руб.	25

для выдачи рекомендаций на дисплей центрального устройства на включение вентиляторов, чтобы предотвратить увеличение содержания вредных примесей сверх ПДК. Аппаратура системы "Диспетчер-2" разработана с применением микропроцессорных больших интегральных схем серий К580 и К1816. Благодаря применению микропроцессорных устройств многие функции реализуются программным путем, что позволяет удовлетворить требования конкретного заказчика изменением программного обеспечения. На вентиляционной установке размещается устройство телеуправления вентилятором с узлом автоматического запуска и контроля параметров двигателя. Этот узел по команде с центрального устройства производит программный запуск двигателя вентилятора. При опасных нарушениях режима работы двигателя вентилятора узел осуществляет аварийную остановку. В систему "Диспетчер-2" можно включать до восьми устройств телеуправления вентиляторами.

Технические данные системы "Диспетчер-2"

Таблица 2.6

Параметр	Ед. измерения	Значение параметра
Вид канала связи		УКВ радиоканал
Несущая частота	МГц	33—46
Количество команд управления, передаваемых с центрального устройства (ЦУ) на контролируемые пункты (КП):		
для карьерных вентиляторов	Команда	28
для газоаналитических станций	Команда	7
Количество телесигналов, передаваемых с КП:		
карьерных вентиляторов	Телесигнал	25
газоаналитических станций	Телесигнал	4
Длительность цикла опроса КП:		
при запуске вентилятора	с	0,5
при опросе СГСА	с	1
Условия эксплуатации:		
температура окружающей среды	°С	-25 + +50
относительная влажность воздуха	%	До 95
Электропитание устройств системы:		
напряжение питающей среды	В	220 ± 10(15) %
мощность, потребляемая каждым устройством, не более	кВт	100
Габаритные размеры:		
центрального устройства	мм	1000×1000×750
периферийных устройств	мм	680×690×400
Стоимость системы (в ценах 1990 г.)	тыс. руб.	150

На газоаналитических станциях установлены устройства передачи параметров атмосферы. Таких станций может быть также до восьми. Для связи между центральными устройствами и контролируемыми пунктами могут применяться либо радиоканал, либо проводная связь. Скорость обмена информацией 200 Бод. Быстродействие системы в режиме запуска вентилятора 0,5 с, а в режиме контроля — 4 с. "Диспетчер-2" может применяться в системе нормализации атмосферы глубоких карьеров с высокой интенсивностью технологических процессов на открытых горных разработках. Подсистема передачи данных с газоаналитических станций может найти применение также для контроля состояния атмосферы в городах с напряженной экологической обстановкой.

Промышленные испытания системы "Диспетчер-2" были проведены в 1991—1992 гг. на карьере НГМК [184]. Технические характеристики газоаналитических станций и всей системы приведены в табл. 2.5, 2.6.

Исследования с использованием систем "Диспетчер-1" и "Диспетчер-2" на карьерах НГМК и комбината "Магнезит" позволили разработать рекомендации для разработки и внедрения универсальной системы предупреждения о техногенных загрязнениях на основе газоаналитических модулей, встроенных в таксофоны "Орех" [185]. Системы обеспечивают: непрерывное измерение концентраций взрывоопасных и токсичных компонентов воздушной среды территорий и объектов, на которых установлены таксофоны; передачу информации о загрязнении воздушной среды по сетям АТС всех поколений, включая современные цифровые и тональные АТС; возможность передачи информации по радиоканалу; непрерывную работу без обслуживания в течение года при температуре от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$; автоматическую диагностику технического состояния газоаналитического модуля; устойчивость к преднамеренным или непреднамеренным повреждениям, в том числе ударам, выстрелам дробью, ветровым и климатическим нагрузкам.

ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВОЗДУШНЫХ И ВОЗДУШНО-ВОДЯНЫХ (ДВУХФАЗНЫХ) СТРУЙ, СОЗДАВАЕМЫХ КАРЬЕРНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ НА БАЗЕ ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Параметры струй, развивающихся в стратифицированной атмосфере

При температурных инверсиях в атмосфере карьеров дальность газоздушных струй карьерных вентиляторов уменьшается и может оказаться недостаточной для воздействия на слои воздуха у дна карьера. В связи с этим определение рационального размещения установок относительно дна карьера следует производить с учетом температурной стратификации.

Расчет параметров струй вентилятора можно производить по формуле, полученной Г. Н. Абрамовичем [175] и А. А. Вершининым [186] на основе теоремы о количестве движения тела переменной массы,

$$\bar{y} = 0,052Ar \frac{\bar{x}^3}{\cos^2 \alpha} + \bar{x} \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.1)$$

где $\bar{y} = y/d_0$, $\bar{x} = x/d_0$ — безразмерные координаты траектории струи в вертикальной плоскости;

d_0 — диаметр струи в начальном сечении, м;

α — угол наклона струи в вертикальной плоскости (от горизонтали вниз $\alpha < 0$, вверх $\alpha > 0$), град;

Ar — критерий Архимеда.

Характер температурной стратификации воздуха в атмосфере карьера можно учесть в критерии Архимеда

$$Ar = \frac{gd_0}{U_0^2} \cdot \frac{\Delta T_c}{T_h}, \quad (3.2)$$

где ΔT_c — избыточная температура струи, К;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

U_0 — средняя скорость струи в начальном сечении струи, м/с;

T_h — температура воздуха в карьере на уровне размещения установки, К.

Поскольку у вентиляторов на базе авиационных турбовинтовых двигателей (ТВД) струя является газозвоздушной, величину средней скорости из критерия Архимеда можно определить по формуле

$$U_0 = \frac{m_r U_r + m_n U_n}{m_n + m_r} = \frac{U_r + U_n \frac{m_n}{m_r}}{1 + \frac{m_n}{m_r}}, \quad (3.3)$$

где U_n — скорость воздуха (м/с) в начальном сечении струи (при режиме двигателя 0,85 номинала $U_n = 61$ м/с);

m_n — весовой расход воздуха, кг/с;

m_r — весовой расход газов, кг/с;

U_r — скорость газов реактивной струи, м/с.

В диапазоне эксплуатационных режимов система автоматического регулирования поддерживает постоянное отношение $m_n/m_r = \text{const}$ и $T_r = 653\text{K} = \text{const}$. Отношение m_n/m_r можно рассчитать для НК-12КВ-1М по формуле

$$\frac{m_n}{m_r} = \frac{\rho_n Q_n}{\rho_r Q_r} = \frac{\rho_n Q_n}{0,4 \rho_h Q_r} = \frac{1568}{0,4 \cdot 94} = 41,3. \quad (3.4)$$

Значение скорости U_r можно определить на основе уравнения расхода

$$U_r = \frac{Q_r}{\pi r_{гг}^2} = \frac{24 \text{ м}^3/\text{с}}{0,5 \text{ м}^2} = 188 \text{ м/с},$$

где $r_{гг}$ — радиус газовой струи, м.

Таким образом, $U_0 = \frac{188 + 61 \cdot 41,3}{1 + 41,3} = 64 \text{ м/с}.$

Характер стратификации в критерии Архимеда учитывается в отношении

$$\frac{\Delta T_c}{T_h} = \frac{T_c - T_h}{T_h}, \quad (3.5)$$

где T_c — температура газозвоздушной струи, К.

Для политропической стратификации

$$T_h = T_0 \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0} \right), \quad (3.6)$$

где T_0 — температура воздуха у дна карьера, К;

γ — температурный градиент, К/м;

h — высота расположения установки, м.

Выражение (3.6) справедливо и при переменном значении γ в различных слоях.

$$T_h = T_0 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i \Delta h_i}{T_0} \right), \quad (3.7)$$

где γ_i — температурный градиент в i -м слое, К/м;

Δh_i — толщина слоя, м.

Из выражения (3.7) в скобках, согласно теореме о среднем, имеем

$$\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i \Delta h_i}{h} h = \frac{\Delta T}{h} h = \gamma_{\text{ср}} h. \quad (3.8)$$

Температуру газозадушной струи можно определить из уравнения теплосодержания:

$$T_c = \frac{C_r m_r T_r + C_n m_n T_n}{C_r m_r + C_n m_n} = \frac{T_r + T_n \frac{C_n m_n}{C_r m_r}}{1 + \frac{C_n m_n}{C_r m_r}}, \quad (3.9)$$

где C_r, T_r — теплоемкость и температура газов, Дж/кг К и К;

$C_n, T_n(T_h)$ — теплоемкость и температура окружающего воздуха, Дж/кг К и К.

Для вентилятора НК-12КВ-1М

$$T_c = \frac{T_r + T_h \frac{1020}{1100} \times 41,3}{1 + \frac{1020}{1100} \times 41,3} = \frac{653\text{К} + 38,4 \cdot T_h}{39,4}.$$

Значение избыточной температуры $\Delta T_c = T_c + T_h = \frac{T_r - T_h}{39,4} = 0,0245 (T_r - T_h)$.

$$\frac{\Delta T_c}{T_h} = 0,0254 \left(\frac{T_r}{T_h} - 1 \right) = 0,0254 \left[\frac{T_c}{T_0 \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0} \right)} - 1 \right].$$

После подстановки значений параметров, определяющих критерий Архимеда, уравнение (3.1) приобретает вид

$$\bar{y} = 1,83 \cdot 10^{-5} \left[\frac{T_r}{T_0 \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0} \right)} - 1 \right] \frac{\bar{x}^3}{\cos^3 \alpha} + \bar{x} \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.10)$$

Обозначив $B = 1,83 \cdot 10^{-5} \left[\frac{T_r}{T_0 \left(1 - \frac{\gamma h}{T_0} \right)} - 1 \right]$, упростим уравнение (3.10).

$$\bar{y} = B \frac{\bar{x}^3}{\cos^3 \alpha} - \bar{x} |\operatorname{tg} \alpha|. \quad (3.11)$$

Взяв производную уравнения (3.11), определим координаты точки перегиба струи:

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \frac{3B\bar{x}^2}{\cos^3 \alpha} - \operatorname{tg} \alpha = 0, \quad (3.12)$$

$$\bar{x}_n = \left(\frac{\sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3B} \right)^{1/2}. \quad (3.13)$$

После подстановки (3.13) в (3.11) получим

$$\bar{y}_n = \frac{2}{3} \operatorname{tg} \alpha \left(-\frac{\sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{3B} \right)^{1/2}. \quad (3.14)$$

Точка пересечения оси струн с осью X определяется из исходного уравнения:

$$\bar{x}_1 / \bar{y} = 0; \quad (3.15)$$

$$\bar{x}_2 = \left(-\frac{\sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{B} \right)^{1/2}. \quad (3.16)$$

Длину траектории оси струн можно определить по формуле

$$L = \int_0^{\bar{x}} \sqrt{1 + \left(\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \right)^2} d\bar{x}. \quad (3.17)$$

Из (3.13) и (3.14) имеем

$$\frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{\bar{x}^2}{\bar{x}_n^2} + 1 \right). \quad (3.18)$$

После упрощения $\bar{x} = \bar{x} / \bar{x}_n$ получим из (3.17) с учетом (3.18)

$$L = \bar{x}_n \int_0^{\bar{x}} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha (\bar{x}^2 - 1)^2} d\bar{x}. \quad (3.19)$$

Выражение (3.19) можно преобразовать в виде:

$$L = \bar{x}_n \operatorname{tg} \alpha \int_0^{\bar{x}} \sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \operatorname{cosec}^2 \alpha} d\bar{x}. \quad (3.20)$$

Для вычисления значения интеграла в (3.20) сделаем преобразование.

$$J_0 = \int_0^{\bar{x}} \sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}} d\bar{x} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{\bar{x}} \frac{(\bar{x}^4 - \bar{x}^2) d\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}}} + \int_0^{\bar{x}} \frac{\bar{x}^2 d\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}}} + \\
 &\quad + \frac{1}{\sin^2 \alpha} \int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}}}. \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

Первый интеграл в (3.21) вычисляем интегрированием по частям.

$$J_1 = \frac{1}{2} \bar{x} \sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}} - \frac{1}{2} J_0. \quad (3.22)$$

Второй и третий интегралы в (3.21) приводятся к виду

$$J_2 = \int \frac{\bar{x}^2 d\bar{x}}{\sqrt{a^2 + \bar{x}^2} \cdot \sqrt{b^2 + \bar{x}^2}} = \frac{\bar{x} \sqrt{a^2 + \bar{x}^2}}{\sqrt{b^2 + \bar{x}^2}} - aE(\varphi, k); \quad (3.23)$$

$$\left[\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\bar{x}}{b}, k = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right] [\bar{x} \rightarrow 0; 0 < b < a];$$

$$\begin{aligned}
 J_3 &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^4 - \bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}}} = \\
 &= \frac{1}{\sin^2 \alpha} \int_0^{\bar{x}} \frac{d\bar{x}}{\sqrt{a^2 + \bar{x}^2} \sqrt{b^2 + \bar{x}^2}} = \frac{1}{a} F(\varphi, k); \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

$$\left[\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\bar{x}}{b}, k = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right] [0 < b < a, \bar{x} \rightarrow 0].$$

В уравнениях (3.23), (3.24) значения эллиптических интегралов вычисляются по таблицам, а коэффициенты рассчитываются путем разложения подкоренных выражений в J_2 и J_3 и с использованием метода неопределенных коэффициентов.

$$b = \sqrt{1 + \frac{2 - \sqrt{(1 - |\sin \alpha|)(3 + |\sin \alpha|)}}{|\sin \alpha|}}; \quad (3.25)$$

$$k = \frac{1,4 \cdot \sqrt{(1 + |\sin \alpha|)(3 + |\sin \alpha|)}}{\sqrt{|\sin \alpha|} \cdot \sqrt{1 + \frac{2 + \sqrt{(1 + |\sin \alpha|)(3 + |\sin \alpha|)}}{|\sin \alpha|}}}; \quad (3.26)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\bar{x}}{\sqrt{1 + \frac{2 - \sqrt{(1 + |\sin \alpha|)(3 + |\sin \alpha|)}}{|\sin \alpha|}}}; \quad (3.27)$$

$$a = \sqrt{1 + \frac{2 + \sqrt{(1 + |\sin \alpha|)(3 + |\sin \alpha|)}}{|\sin \alpha|}}. \quad (3.28)$$

Таким образом, с учетом (3.22)–(3.24) уравнение (3.21) приводится к виду

$$J_0 = \frac{1}{3} \bar{x} \sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}} + \frac{2}{3} \left[\frac{\bar{x} \sqrt{a^2 + \bar{x}^2}}{\sqrt{b^2 + \bar{x}^2}} + aE(\varphi, k) + \frac{2}{\sin^2 \alpha \cdot 3a} F(\varphi, k) \right]. \quad (3.29)$$

После подстановки (3.29) в (3.20) получим

$$L = \bar{x}_n |\operatorname{tg} \alpha| \left\{ \frac{\bar{x}}{3} \sqrt{\bar{x}^4 - 2\bar{x}^2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha}} + \right.$$

$$+ \frac{2}{3} \left[-\frac{\bar{x} \sqrt{a^2 + \bar{x}^2}}{\sqrt{b^2 + \bar{x}^2}} + aE(\varphi, k) + \frac{1}{\sin^2 \alpha \cdot a} \cdot F(\varphi, k) \right]. \quad (3.30)$$

При слоистой инверсии с $\gamma \neq \text{const}$ расчет глубины проникновения струи (y_n) можно производить по слоям с различными γ_i от уровня расположения установки. Для расчета параметров B и \bar{y}_n первого слоя за T_0 принимается температура на нижней границе первого слоя, а температура на уровне расположения уста-

новки $T_h = T_0 = \left(1 - \frac{\gamma \Delta h}{T_0} \right)$. Если рассчитанное по формуле (3.14)

значение $\bar{y}_n \cdot d_0 > \Delta h_{ca}$, то для расчета новых значений B и \bar{y}_{n2} принимается T_{02} на нижней границе второго слоя, а температура на уровне расположения установки.

$$T_h = T_{02} \left[1 - \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2T_0} (\Delta h_{ca1} + \Delta h_{ca2}) \right]. \quad (3.31)$$

Если $d_0 \cdot \bar{y}_{n2} > \Delta h_{ca} + \Delta h_{ca2}$, в расчет принимается следующий слой и так до тех пор, пока не будет $y_{n\pi} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{cai}$. После этого

производится расчет параметров $\bar{y} = f(\bar{x}, \gamma_{cp}, \alpha)$, $\bar{x}_n = f(\alpha, \gamma_{cp})$, уточняется $\bar{y}_n = f(\alpha, \gamma_{cp})$, определяется точка пересечения оси струи с осью XO , (\bar{X}_1).

Расчетами по формулам (3.13)—(3.30) при $\gamma = -0,1$ К/м = const, $T_0 = 240$ К, $\alpha = -20^\circ$, $h_y = 185$ м установлено, что $\bar{y}_n = -14,6$ ($y_n = -85$ м), $\bar{x}_n = 60$ ($x_n = 350$ м), $\bar{x}_1 = 104$ ($x_1 = 600$ м). Расчетами по формуле (3.30) с использованием таблиц неполных интегралов установлено, что длина траектории оси струи НК-12КВ-1М в точке перегиба ($\bar{x}_1 = 1$) $L_x = 75$ ($L_x = 435$ м), а в точке пересечения с осью X ($\bar{X} = 1,7$) $L = 116$ ($L = 672$ м). Диаметр струи в точке перегиба составляет $\bar{D}_2 = 1 + 0,444 \bar{L}_n = 27,6$ ($D_i = 195$ м), т. е. нижняя граница струи располагается в 3 м от дна карьера.

Расход воздуха в точке перегиба струи составляет

$$Q_{Ln} = 4,36(a \bar{L}_n + 0,145);$$

$$Q_0 = 4,36 \cdot 1680 \text{ м}^3/\text{с} \cdot (75 \cdot 0,1 + 0,145) = 56 \text{ 000 м}^3/\text{с}.$$

Средняя по расходу скорость воздуха в точке перегиба составляет

$$U_{\bar{L}\bar{n}} = \frac{4Q_{\bar{L}\bar{n}}}{\pi Q_{\bar{L}\bar{n}}^2} = \frac{4 \cdot 56000}{3,14 \cdot 195^2} = 1,93 \text{ м/с.}$$

В точке пересечения ось струи с осью OX $D_{\bar{L}X} = 305$ м, $Q_{\bar{L}X} = 82\,500$ м³/с, $U_{\bar{L}X} = 1,15$ м/с. Из анализа коэффициента B , входящего в расчет основных параметров траектории струи, можно установить, что при больших отрицательных значениях γ целесообразно выводить часть газов реактивного выхлопа. Это будет способствовать увеличению глубины проникновения в атмосферу, а также уменьшит токсичность струи. К примеру, при $\gamma = -0,1$ К/м и $\alpha = -20^\circ$ за счет вывода 50 % газов струи реактивного выхлопа ($T_r = 377$ К) глубину проникновения можно увеличить в 1,8 раза $\bar{y}_n = -26,3$ ($\bar{y}_n = 150$ м).

3.2. Процесс взаимодействия струй

Размещение вентиляторных установок в карьерном пространстве определяет эффективность процессов искусственной вентиляции. Выбор рационального размещения вентиляторов производится с учетом технологических условий, а также параметров карьеров и струй.

При равномерном расположении на одном уступе однотипных установок (рис. 3.1), создающих турбулентные струи, расстояние до плоскости слияния отдельных потоков определится из уравнения

$$\bar{L}_1 = \frac{\bar{L} - 1}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}, \quad (3.32)$$

где $\bar{L} = l/d_0$ — расстояние между установками в калибрах;
 $\beta/2 = 12,5^\circ$ — половина угла полного раскрытия струи, град.

В общем виде зависимость между диаметром струи и дальностью определяется формулой

$$\bar{D}_{\bar{L}} = 1 + 2\bar{L} \operatorname{tg} 12,5^\circ, \quad (3.33)$$

где $\bar{D}_{\bar{L}} = D/d_0$ — диаметр струи на расстоянии в калибрах.

Из уравнения (3.32)

$$\bar{L} = \frac{L}{d_0} = \frac{\bar{D}_L - 1}{0,444} = 2,25 (\bar{D}_L - 1). \quad (3.34)$$

При слиянии струй суммарная площадь потока на расстоянии составит

$$F_{\Sigma} = \frac{\pi D^2}{4} \left[1 - \frac{n-1}{n} 2\bar{F}_{\text{сег}} \right], \quad (3.35)$$

где n — количество струй;

D_i — диаметр одиночной струи на расстоянии L , м;

$\bar{F}_{\text{сег}} = \frac{F_{\text{сег}}}{\pi D_i^2}$ — относительная площадь сегмента, зоны пере-

крытия струй.

Приведенная к площади в точке слияния потоков суммарная площадь общего потока составит

$$\bar{F}_{\Sigma} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{L_1}} = \frac{D_L^2}{D_{L_1}^2} \left(1 - \frac{n-1}{n} 2\bar{F}_{\text{сег}} \right), \quad (3.36)$$

где $F_{L_1} = \pi D_{L_1}^2/4$ — площадь одиночной струи в точке слияния потоков на расстоянии L ;

$D_{L_1} = l$ — диаметр струи на расстоянии L_1 .

Из геометрических соображений

$$\bar{F}_{\text{сег}} = \bar{F}_{\text{сект}} - \bar{F}_{\Delta}. \quad (3.37)$$

Относительная площадь сектора определяется из формулы

$$\bar{F}_{\text{сект}} = \frac{4F_{\text{сект}}}{\pi D_L^2} = \frac{90^\circ - \arcsin \frac{l}{D_L}}{180^\circ}. \quad (3.38)$$

Относительная площадь треугольника

$$\bar{F}_{\Delta} = \frac{l}{\pi \bar{D}_L} \sqrt{1 - \frac{l^2}{\bar{D}_L^2}}. \quad (3.39)$$

Таким образом,

$$\bar{F}_{\text{ср}} = \left[\frac{90^\circ - \arcsin \frac{l}{D_L}}{180^\circ} - \frac{l}{\pi D_L} \sqrt{1 - \frac{l^2}{D_L^2}} \right]. \quad (3.40)$$

Согласно закону сохранения количества движения,

$$\bar{U}_\Sigma^2 \bar{F}_\Sigma = 1, \quad (3.41)$$

где $\bar{U}_\Sigma = U_\Sigma / U_0$ — относительная средняя скорость суммарного потока.

Из (3.41)

$$U_\Sigma = 1 / \sqrt{\bar{F}}. \quad (3.42)$$

Приведенный расход воздуха в общем потоке определяется из соотношения

$$Q_\Sigma = Q_{\Sigma L} / Q_{L1} = \bar{U}_\Sigma \bar{F}_\Sigma = \sqrt{\bar{F}_\Sigma}. \quad (3.43)$$

Из (3.43) значение суммарного расхода воздуха составит

$$Q_\Sigma = Q_{\Sigma L} \cdot \sqrt{\bar{F}_\Sigma} = 4,36 \cdot Q_0 n \cdot (a\bar{L}_1 + 0,145).$$

$$\frac{D_L}{D_{L1}} \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} \cdot 2\bar{F}_{\text{ср}}}. \quad (3.44)$$

С учетом уравнения (3.44) значение средней скорости суммарного потока можно рассчитать по формуле

$$\bar{U}_\Sigma = \frac{U_\Sigma}{U_0} = \frac{4,36 [2,25a(l-1) + 0,145]}{l \cdot D_L \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} \cdot 2\bar{F}_{\text{ср}}}}. \quad (3.45)$$

При заданной скорости U_Σ (например, 1,3 м/с) и известной U_0

из уравнения (3.45) можно определить значение \bar{l} при различных \bar{D}_L . Пусть $U_0 = 64$ м/с, тогда

$$\bar{l} \bar{D}_L \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} \bar{F}_{\text{сгр}}} = 214 \left(a \cdot 2,25 (\bar{l} - 1) + 0,145 \right). \quad (3.46)$$

При $\bar{D}_L = 4\bar{l}$; $a = 0,1$; $n = 3$ и $\bar{F}_{\text{сгр}} = 0,343$ получим уравнение

$$2,95\bar{l}^2 - 48\bar{l} + 17 = 0. \quad (3.47)$$

Из уравнения (3.47) $\bar{l} = 15,8$, а $l = l d_0$. Для НК-12КВ $l = 91,5$ м. Дальность потока трех НК-12КВ при $U_{\Sigma} = 1,3$ м/с составит $\bar{L} = 2,25(\bar{D}_L - 1) = 2,25(63,2 - 1) = 140$; $L = 5,8 \cdot 140 = 815,0$ м, в то время как дальность (при $U_{\text{сп}} = 1,3$ м/с) одиночных струй, рассчитанная по формуле Г. Н. Абрамовича [157], не превышает 97 калибров (~565 м).

Расход воздуха в потоке взаимодействующих струй, рассчитанный по формуле (3.44), составит

$$Q_{\Sigma L} = 4,36 Q_0 \cdot 3 [2,25 \cdot 0,1(15,8 - 1) + 0,145] \cdot \frac{4\bar{l}}{l} \sqrt{1 - \frac{4}{3} \bar{F}_{\text{сгр}}} = 127 Q_0,$$

в то время как суммарный расход воздуха не взаимодействующих струй на пределе дальности (при $U_{\text{сп}} = 1,3$ м/с) составит

$$Q_{\Sigma L} = 4,36 Q_0 \cdot 3(97,0 \cdot 0,1 + 0,145) = 128 Q_0.$$

При отсутствии вентиляционных берм для размещения более двух установок (воронкообразные карьеры) целесообразно размещать вентиляторы в два яруса (рис. 3.2). При этом в расчетных формулах следует использовать значение $\bar{F}_{\text{сгр}}$, полученное из геометрических соображений.

$$\bar{F}_{\text{сгр}} = \frac{1}{2} \left(\frac{90^\circ - \arcsin \frac{l}{\bar{D}_i}}{180^\circ} - \frac{l}{\pi \bar{D}_i} \sqrt{1 - \frac{l^2}{\bar{D}_i^2}} + \frac{1}{12} \left(1 - \frac{l^2}{\bar{D}_i^2} \right) \right). \quad (3.48)$$

При $\bar{D} = \bar{l}$ имеем $\bar{F}'_{\text{ср}} = 0$, что означает $\bar{l} = 2,25(\bar{l} - 1)$.

При $\bar{D}_1 = 4\bar{l}$ $\bar{F}'_{\text{ср}} = 0,260$ и $\bar{F}_z = 4\sqrt{1 - \frac{2}{3} \cdot 0,260} = 3,63$.

Расстояние между установками определится из уравнения $3,63\bar{l}^2 - 48\bar{l} + 17 = 0$, $\bar{l} = 13$, $l = 5,8 \cdot 13 = 75,5$ м.

Дальнобойность потока составит 115 калибров (670 м).

Расход воздуха в потоке трех взаимодействующих струй, расположенных по равнобедренному треугольнику, $Q_{zL} = 4,36Q_0 \cdot 3 \cdot 3,63(0,225 \cdot 13 - 0,08) = 135Q_0$.

Расстояние между установками нижнего и верхнего яруса определится из формулы $\Delta h = \frac{\bar{l}}{2\text{tg}30^\circ} = \frac{13}{2 \cdot 0,576} = 11,3$ ($\Delta h = 65$ м).

Порядок расчета параметров потока взаимодействующих струй:

1. Задается отношение $\bar{D}_L/\bar{l} = 1/6$ и по формулам (3.40) и (3.48) определяются значения $\bar{F}'_{\text{ср}}$ и $\bar{F}_{\text{ср}}$.

2. Для принятого количества установок (n) рассчитывается расстояние между ними (\bar{l}) по формуле

$$\bar{l} = 24 \frac{1 + \sqrt{1 - 0,0146 \frac{\bar{D}_L}{\bar{l}} \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} 2F'_{\text{ср}}}}}{\bar{D}_L/\bar{l} \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} 2F_{\text{ср}}}} \quad (3.49)$$

3. По вычисленным значениям \bar{l} и заданному отношению \bar{D}_L/\bar{l} рассчитывается дальнобойность (скорость потока $U_{\text{ср}} \geq 0,6$ м/с) по формуле

$$\bar{l} = 2,25(\bar{D}_L - 1). \quad (3.50)$$

4. Рассчитывается расход воздуха в потоке взаимодействующих струй по формуле

$$Q_z = 4,36Q_0 \cdot n(0,225\bar{l} - 0,08) \frac{\bar{D}_L}{\bar{l}} \sqrt{1 - \frac{n-1}{n} 2F_{\text{ср}}} \quad (3.51)$$

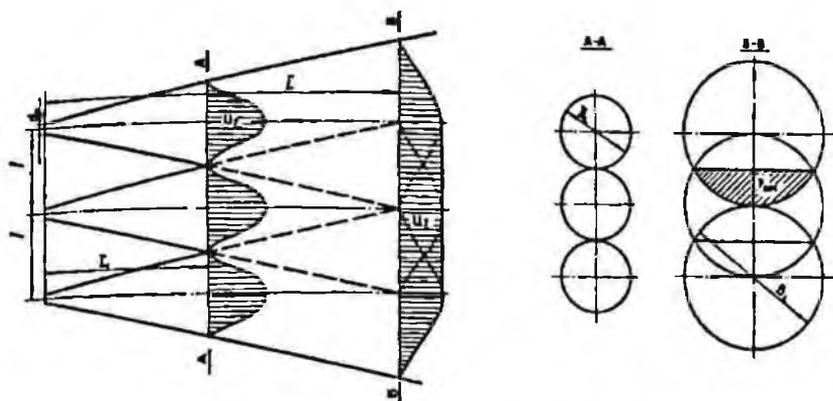


Рис. 3.1. Взаимодействие струй при одноярусном расположении установок

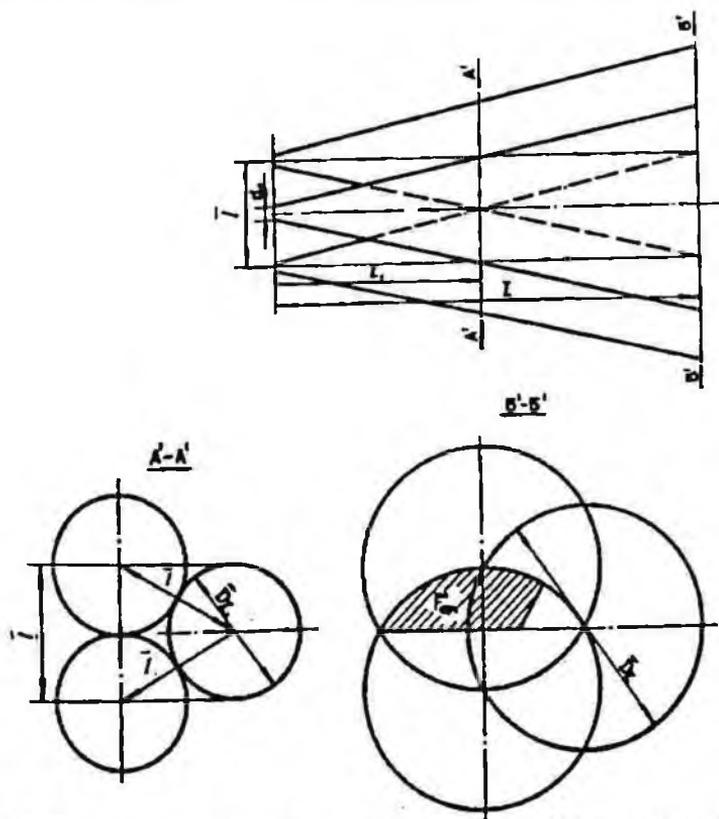


Рис. 3.2. К расчету параметров струй при двухъярусном расположении установок

3.3. Лабораторные исследования параметров струй, перемещающихся в пространстве

Траектория оси турбулентной струи искривляется под воздействием гравитационных сил или в результате взаимодействия гидродинамических сил струи и сносящего потока [157, 197]. Поэтому прежде, чем приступить к исследованию схем вентиляции с применением перемещающихся струй, необходимо исследовать их параметры и установить влияние скоростей перемещения на дальность и степень искривления струй.

На основании экспериментальных исследований струй в сносимом потоке Ю. В. Ивановым получены уравнения:

а) для определения траектории оси струи

$$a\bar{X} = 195 \left(\frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2} \right)^{1,3} (a\bar{Y})^3 - a\bar{Y} \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad (3.52)$$

где $\bar{X} = X/d_0$, $\bar{Y} = Y/d_0$ — безразмерные координаты точек траектории оси струи;

d_0 — диаметр струи в начальном сечении, м;

ρ_1 — плотность воздуха в сносимом потоке, кг/м³;

v_1 — скорость сносимого потока, м/с;

ρ_2 — плотность воздуха в начальном сечении струи, кг/м³;

v_2 — скорость воздуха в начальном сечении струи, м/с;

a — коэффициент структуры струи;

α_0 — угол атаки струи, рад;

б) для определения дальности

$$\bar{D} = \frac{D}{d_0} = k \cdot \frac{v_1}{v_2} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (3.53)$$

где k — безразмерный коэффициент, зависящий от a_0 и d_0 .

В результате исследований Ю. В. Ивановым установлено [187]:

1) с уменьшением гидродинамического параметра $q = \rho_1 v_1^2 / \rho_2 v_2^2$ траектория оси струи становится более полой;

2) глубина проникновения струи (D) в поперечный поток не зависит от температуры газа в струе и потоке;

3) максимальную дальность имеют струи при $\alpha_0 = \pi/2$;

4) сечение струи под воздействием поперечного потока приобретает подковообразную форму.

Анализ формул (3.52) и (3.53) свидетельствует о некоторой противоречивости второго вывода: так как $\rho_1 = f(T_1)$ и $\rho_2 = f(T_2)$, то дальнобойность $D = f(T_1, T_2)$. Кроме того из анализа формулы (3.52) следует, что максимальная глубина проникновения струи в сносящий поток (по оси OX), а также координата точки пересечения траектории оси струи с осью OY при $\alpha_0 < \pi/2$, зависят от α_0 . Вследствие этого координата точки пересечения изотахи $U_m = 0,05 \cdot U_0$ с осью OY будет при $\alpha_0 < \pi/2$, то есть максимальную дальнобойность при $q = idem$ будут иметь струи при $\alpha_0 < \pi/2$.

Необходимо отметить, что искривление траектории струи в сносящем потоке отличается от подобного явления при перемещении струи по своей физической сущности. В первом случае происходит взаимодействие частиц струи с движущимися частицами воздуха в сносящем потоке. При этом в передней части сечения струи возникает зона повышенного давления, в точках которой происходит торможение частиц набегающего потока, а с тыльной стороны возникает зона пониженного давления (вихревая зона). Вследствие этого круглое сечение трансформируется в подковообразное. Во втором случае частицы струи, вытекающие из насадка со скоростью U_0 , движутся относительно частиц неподвижной среды со скоростью W .

Исследованиями затопленных струй прямоугольного сечения, перемещающихся в однородной среде, было установлено смещение максимумов осевой скорости в сечениях струи в направлении перемещения, а также деформация профиля сечения как в направлении перемещения, так и в вертикальной плоскости [188]. Сечение перемещающейся струи приобретает эллипсообразную форму, в отличие от подковообразной — при обтекании струи потоком частиц среды. Однако примененный в исследованиях тензометрический метод измерения скорости в сечениях перемещающейся струи имеет существенные недостатки: а) зависимость уровня сигнала от посторонних возмущений среды; б) низкую чувствительность.

Этими недостатками объясняется то, что при малых скоростях углового перемещения $\omega \leq 0,5$ рад/с всплеск отметчика створа струи совпадал с максимумом графика скорости в сечениях перемещающейся струи, в то время как динамическая ось струи искривлялась и, следовательно, совпадения быть не должно. Кроме того, при угловом перемещении как самой струи, так и создающего ее устройства, в среде возникает вихревая циркуляция частиц, которая воздействует на датчик. Этим и объясня-

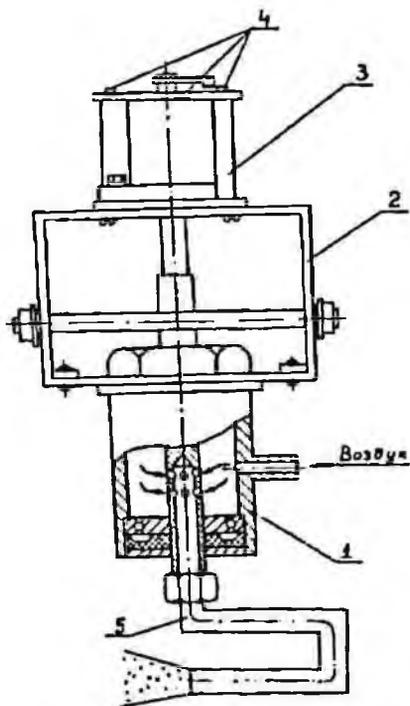


Рис. 3.3. Имитатор вентилятора

ется нестабильность фиксируемых сигналов, соответствующих исследуемым параметрам: максимальные значения скорости в одном и том же сечении струи в течение опыта изменялись в 1,5—2 раза. Этого влияния на тензодатчики не удалось устранить экранирующими сетками. Низкой чувствительностью тензометрического способа объясняется и тот факт, что в шестом створе датчик не регистрировал перемещения струи, хотя расстояние до него составляло всего лишь утроенную ширину струи.

На основании изложенного нами был сделан вывод о неприемлемости рассмотренного способа для исследования параметров перемещающихся затопленных воздушных струй вследствие малости динамических усилий. Исследование параметров турбулентных изотермических струй при их перемещении в пространство производились на стенде, состоящем из фотокамеры типа РФК-5, штатива, планшетов с нанесенной сеткой полярных или декартовых координат, фермы с блоками, механизма для поступательного перемещения и имитаторов [189]. Задымленный и охлажденный воздух поступал из дымового генератора в имитатор (рис. 3.3), состоящий из корпуса 1, каретки 2, приводного электромеханизма 3 типа МП-5 с концевыми выключателями 4 и насадок 5. Приводной механизм использовался при исследовании струй с угловым перемещением имитаторов вентиляторных установок. При этом питание на электромеханизм подавалось непосредственно на штепсельный разъем, минуя концевые выключатели, что позволило обеспечить непрерывное вращение насадка. Скорость углового перемещения насадка контролировалась электронно-оптическим тахометром

Рис. 3.4. Схема электронно-оптического тахометра

(рис. 3.4) по шкале частотомера ЧЗ-7, используемого в качестве вторичного прибора.

При исследовании траекторий осей струй с поступательным перемещением каретка имитатора располагалась на направляющих угольниках фермы и соединялась с блоками капроновой нитью. При помощи электромеханизма типа МВР-ПВ, приводящего во вращение один из блоков с намотанной на него капроновой нитью, осуществлялось поступательное перемещение имитатора по ферме со скоростью W . Величина скорости перемещения определялась по градуировочному графику электромеханизма $W = f(U_{пр.})$.

Заданная начальная скорость истечения струи воздуха из насадка поддерживалась блоком автоматического регулирования расхода, установленным на дымовом генераторе. Регулятор расхода воздуха представляет собой нелинейную систему автостабилизации релейного типа, состоящую из фотоэлектрического датчика, поплавкового ротаметра типа РС-5 и релейного усилителя. Основными элементами датчика являются координатные рейки, осветитель и фотодиодная головка, в которой установлены два германиевых фотодиода таким образом, что расстояние между их оптическими осями превышает на 3—4 мм высоту поплавка ротаметра. С противоположной стороны на уровне оптических осей фотодиодов установлены в осветителе две лампы накаливания. Для предотвращения выброса поплавка из зоны стабилизации в ротаметре установлен ограничитель хода поплавка. В качестве исполнительного механизма регулятора используется шибберная заслонка с приводом от электромеханизма типа МП-5, включенная в разрыв байпасной линии побудителя расхода воздуха. Входные цепи двухканального релейного усилителя с фотодиодами датчика расхода образуют структуру двухвходовой логической ячейки "ИЛИ", принцип действия которой поясняется таблицей 3.1.

Степень искривления траекторий осей определялась графометрической обработкой задымленных струй. На основе анализа экспериментальных данных можно получить зависимости:

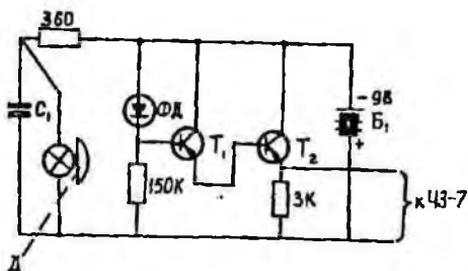


Таблица 3.1

Принцип работы логической ячейки регулятора расхода воздуха

Режим	Логический сигнал с входных и выходных элементов регулятора				Состояние исполнительного механизма (ИМ)
	Логическая ячейка		Выходные реле		
	И вход	П вход	P_1	P_0	
Пуск	1	1	1	1	Закрытие заслонки
Расход ниже нормы	1	0	1	1	Закрытие заслонки
Расход на заданном уровне	0	0	0	0	Стоп
Расход выше нормы	0	1	1	0	Открытие заслонки

$\bar{x}_i = f(\bar{y}_i)$ — для различных значений W , U_0 и α_0 при поступательном перемещении струй,

$\bar{p}_i = f(\varphi_i)$ — для различных значений U_0 , ω , α_0 при угловом перемещении струй,

где W — скорость поступательного перемещения имитатора вентиляторной установки, м/с;

U_0 — скорость струи в начальном сечении, м/с;

α_0 — угол атаки струи, рад;

ω — скорость углового перемещения, рад/с;

d_0 — диаметр сопла имитатора, м.

Исследования параметров изотермических струй при поступательном перемещении имитаторов вентиляторных установок были выполнены по описанной методике. При этом для имитатора вентилятора типа НК-12КВ скорость истечения струй из насадка изменялась в диапазоне $U_0 = 20 \div 50$ м/с при скоростях поступательного перемещения $W = 0,1 \div 0,8$ м/с. Угол атаки струи — между вектором скорости истечения воздуха в начальном сечении U и скоростью поступательного перемещения W — изменялся в интервале $\pi/6 \leq \alpha_0 \leq \pi/2$ с шагом $\Delta\alpha_0 = \pi/12$ (15°). Степень искривления траекторий осей струй, вытекающих из насадков имитаторов, $d_0 = (4 \div 20) \cdot 10^{-3}$ определялась при $\alpha_0 = \pi/2$ (90°) при $Q_0 = 10^{-3}$ м/с. Скорость поступательного перемещения изменялась в интервале $W = (0,1 \div 0,5)$ м/с с шагом $\Delta W = 0,1$ м/с.

После обработки экспериментальных данных были получены графики $\bar{X} = f(\bar{y}, d_0, U_0, W)$, на основе анализа которых было установлено, что траектория оси струи при поступательном перемещении имитатора вентиляторной установки описывается уравнением кубической параболы. Подбор эмпирической формулы производится по методике, основанной на разло-

жения функции по ортогональным многочленам Чебышева [190].

В результате анализа уравнений была получена обобщенная эмпирическая формула траектории оси поступательного перемещения струи

$$\bar{X}_i = \frac{a\bar{Y}_i}{\sin \alpha_0} \left[57,2 \left(\frac{W}{U_0} \right)^{3/2} a\bar{Y}_i (a\bar{Y}_i + 3,1) - 13 \cos \alpha_0 \right], \quad (3.54)$$

где W — скорость поступательного перемещения, м/с;

U_0 — средняя скорость воздуха в начальном сечении струи, м/с;

a — коэффициент структуры струи;

α_0 — угол атаки струи, рад;

$\bar{X}_i = X_i/d_0$; $\bar{Y}_i = Y_i/d_0$ — безразмерные координаты траектории.

На рис. 3.5 представлены расчетные и экспериментальные зависимости. При $\alpha_0 < \pi/2$ из (3.54) можно определить глубину проникновения струи по направлению перемещения при условии

$$\frac{d\bar{X}_i}{d\bar{Y}_i} = \frac{a}{\sin \alpha_0} \left[171,6a\bar{Y}_i \left(\frac{W}{U_0} \right)^{3/2} (a\bar{Y}_i + 2,1) - 13 \cos \alpha_0 \right] = 0. \quad (3.55)$$

После решения уравнения (3.55) получим ординату точки с максимальной глубиной проникновения в направлении $O\bar{X}$

$$\bar{Y}^* = \frac{\sqrt{1 + 0,07 \left(\frac{W}{U_0} \right)^{3/2} - 1}}{0,963a}. \quad (3.56)$$

Абсцисса точки определится при подстановке \bar{Y}^* в уравнение (3.54). Точка пересечения траектории оси струи, перемещающейся под углом $\pi/6 \leq \alpha_0 \leq \pi/2$, с осью $O\bar{Y}$, определится из уравнения (3.54).

$$\text{При } \bar{X} = 0 \quad \bar{Y}^{**} = \frac{\sqrt{1 + 0,0935 \left(\frac{W}{U_0} \right)^{3/2} \cdot \cos \alpha_0 - 1}}{0,64a}. \quad (3.57)$$

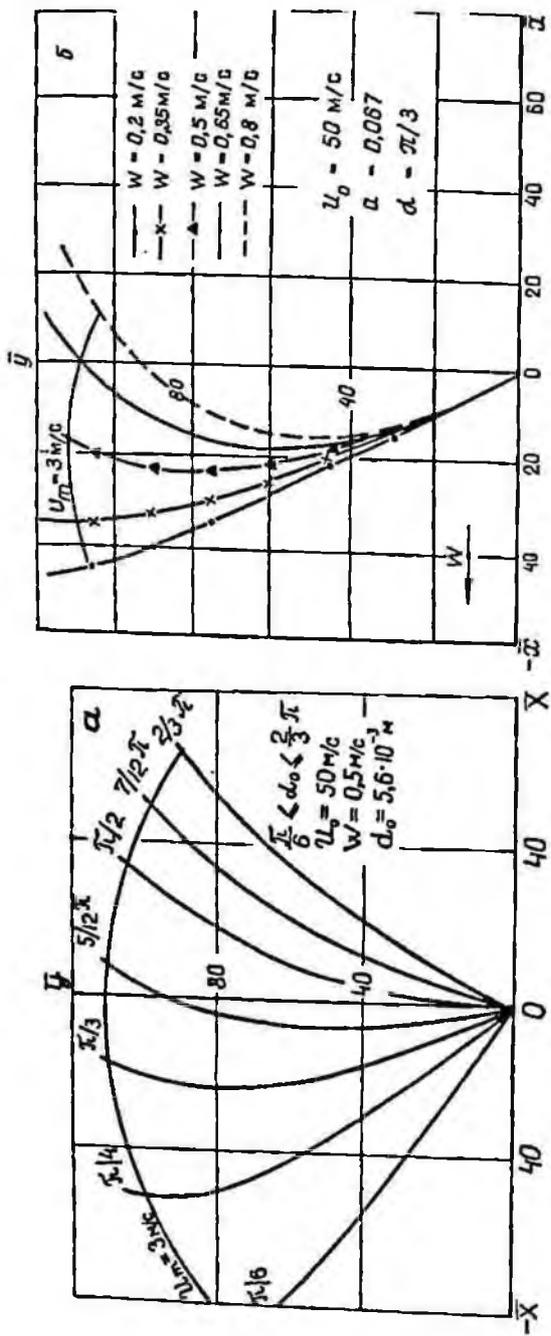


Рис. 3.5. Траектории осей струй при поступательном перемещении.
 \bar{y} — \bar{x} — W равны, соответственно, 0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8 м/с.
 $U_0 = 50 \text{ м/с}$; $\alpha = 0,067$; $d = \pi/3$

Глубину проникновения струи по оси OY определяем, исходя из условия $U_m = 3$ м/с.

Анализ графиков (рис. 3.5), на которых нанесена изотаха осевой скорости $U_m = 3$ м/с, свидетельствует о том, что при $\alpha_0 \geq \pi/2$ дальнобойность турбулентных струй не является максимальной. В зависимости от отношения W/U_0 оптимальный угол атаки перемещающейся струи находится в интервале $\pi/6 \leq \alpha_0 \leq \pi/2$. При этом точки изотакс $U_m = 3$ м/с на траекториях осей перемещающихся струй можно определять по формуле

$$\bar{T}_i = \sum \sqrt{1 + \left(\frac{d\bar{x}_i}{d\bar{y}_i}\right)^2} \cdot \Delta\bar{y}_i, \quad (3.58)$$

где $\bar{T} = l/d_0$ — безразмерная длина траектории оси струи.

На основании расчетов по формулам (3.54)—(3.57) с помощью ЭВМ по разработанной в ИГД МЧМ СССР программе можно составить таблицы.

Ввиду того, что дальнобойность струи $\bar{D}_{\max} \cong 0,95\bar{T}$, в практических расчетах для заданного отношения W/U_0 значение $\alpha_{\text{опт}}$ можно определить по формуле

$$\alpha_{\text{опт}} = \arccos \left(\frac{W}{U_0} \right)^{3/2} \cdot 3,96a \cdot \bar{T} (a\bar{T} + 3,28). \quad (3.59)$$

Для каждого типа вентилятора расчет \bar{T}_i в уравнении (3.58) проводят до значений, определяемых формулой

$$\bar{T}_i = \frac{0,48}{aU_{mi}} - \frac{0,145}{a}, \quad (3.60)$$

где U_0 — средняя скорость истечения воздуха в начальном сечении струи, м/с;

U_{mi} — осевая скорость воздуха в i -м сечении, согласно [191],
 $U_{mi} = 3$ м/с;

a — коэффициент структуры струи.

При исследовании параметров струй, создаваемых имитаторами вентилятора НК-12КВ ($d_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ м), скорость истечения изменялась в диапазоне $20 \leq U_0 \leq 50$ м/с, а скорость углового перемещения $1 \leq \omega \leq 6$ рад/с. Для имитаторов $d_0 = (4, 8, 12, 16, 20) \cdot 10^{-3}$ м скорость углового перемещения изменялась в интервале $1 \leq$

$\leq \omega \leq 5$ рад/с при $Q_0 = 10^{-3}$ м/с. На основании анализа экспериментального материала по методике [190] было получено обобщенное эмпирическое уравнение траектории оси струи при угловом перемещении имитаторов вентиляторных установок

$$\bar{\rho}_i = 114 (a\varphi_i)^3 \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,11} - 10 (a\varphi_i)^2 \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,22} + 0,323 (a\varphi_i) \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,33}, \quad (3.61)$$

где U_0 — скорость истечения струи в начальном сечении, м/с;
 ω — скорость углового перемещения имитатора, рад/с;
 a — коэффициент структуры струи;
 d_0 — диаметр имитатора, м;

$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{d_0}$, φ_i — полярные координаты точек траектории.

Значение функции, при котором струя превращается в след, т. е. $\bar{\rho}_{\max} = R$, определяется из уравнения

$$\frac{d\bar{\rho}_i}{d\varphi_i} = 342a^3\varphi_i^2 \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,11} - 20a^2\varphi_i \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,22} + 0,323a \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,33}, \quad (3.62)$$

откуда

$$\varphi_i = \frac{0,054}{a} \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,44}. \quad (3.63)$$

После подстановки (3.63) в (3.61) получим

$$\bar{\rho}_{\max} = 6,25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{U_0}{\omega d_0} \right)^{1,44}. \quad (3.64)$$

Длина траектории искривленной оси струи определяется по формуле

$$T = \sum_{i=1}^n \sqrt{\bar{\rho}_i^2 + \bar{\rho}_i'^2} \Delta\varphi_0, \quad (3.65)$$

где

$$\bar{r}_i = \frac{d\rho_i}{d\varphi_i} = 342a^3\varphi_i^2 \left(\frac{U_0}{\omega d_0}\right)^{1,11} - 20a^2\varphi_i \left(\frac{U_0}{\omega d_0}\right)^{1,22} + 0,323a \left(\frac{U_0}{\omega d_0}\right)^{1,33} \quad (3.66)$$

Расчет $\bar{T}_i = l/d_0$ — по формуле (3.65) производится до значений, определяемых уравнением (3.60) для заданной изотахи $U_m = 3$ м/с.

Для инженерных расчетов значений \bar{r} и φ , соответствующих заданным U_0 , d_0 и ω , можно ограничиться построением графиков $\bar{r} = f(U_0, \omega, d_0, \varphi)$ по формуле (3.61). Затем для заданной изотахи определяется \bar{T} по уравнению (3.65). На графиках $\bar{r} = f(U_0, \omega, d_0, \varphi)$ откладывается значение с помощью планиметра и определяются значения \bar{r} и φ , соответствующие заданному отношению U_0/U_{mi} .

Анализ результатов исследований параметров струй при угловом перемещении их свидетельствует о том, что в зависимости от места расположения установок целесообразно изменять режим работы авиадвигателей. Так, при $\bar{T} = 90$ обеспечивается проветривание Центрального карьера комбината "Ураласбест" в интервале скорости углового перемещения $10^{-3} \leq \omega_n \leq 5 \cdot 10^{-3}$ рад/с на режиме работы авиадвигателя НК-12КВ 0,7 номинала ($U_0 = 40$ м/с).

Для обеспечения условий формирования струй в этом интервале ω_n необходимо, чтобы $\varphi_{\min} \geq 7/45\pi$ (рис. 3.6, а). При работе двигателя вентилятора на режиме 0,85 номинала ($U_0 = 50$ м/с) обеспечивается проветривание карьера с $\bar{T}_{\max} = 108$, $10^{-3} \leq \omega_n \leq 6 \cdot 10^{-3}$ рад/с, $\varphi_{\min} \geq 5/36\pi$ (рис. 3.6, б).

Аналогичные расчеты можно произвести для других средств искусственной вентиляции, создающих изотермические струи.

3.4. Результаты натуральных и аналитических исследований параметров воздушных струй карьерных вентиляторов на базе ТВД

Съемка профилей скоростей струй в начальном сечении (на фреze реактивного сопла) на различных эксплуатационных режимах вентиляторных установок на базе ТВД; съемка профилей

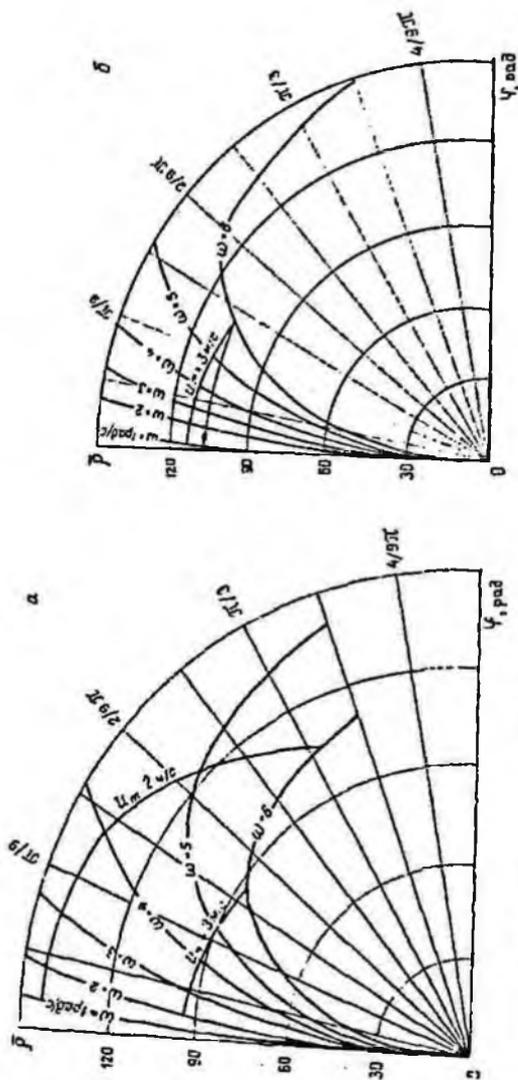


Рис. 3.6. Влияние режима работы двигателя на параметры перемещающихся струй при:

а — 0,7 номинала; б — 0,85 номинала.
 $\alpha = 0,067$; $U_0 = 50$ м/с; $\phi_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$ рад; $\omega_0 = 1 + 6$ рад/с

скорости настилающейся струи в приземном слое; определение влияния избыточного тепла, вносимого в воздушную струю газами реактивного выхлопа проводили на ровных площадках с размерами, при которых исключалось влияние каких-либо препятствий на формирование струи, а также в карьере при разности отметок уступа и дна карьера, достаточной для того, чтобы струя в карьере развивалась как свободная. Давление (динамическое, статическое и полное) в струе, создаваемой воздушным винтом, измеряли микроманометром ММН с трубкой Прандтля. В качестве рабочей жидкости в микроманометре использовался четыреххлористый углерод (CCl_4). Трубку по радиусу струи перемещали с помощью координатника, установленного на платформе автомашины (рис. 3.7). Давление в начальном сечении реактивной струи измеряли с помощью ртутного манометра. Замеры скоростей в основном участке настилающейся струи производили чашечными анемометрами МС-13 на высоте 2, 4, 6 м. Скорость в сечении измеряли в направлениях в обе стороны от оси струи к ее границе. Скорость ветра определяли крыльчатым анемометром АСО-3. Мощность, потребляемая воздушным винтом, измерялась с помощью стандартного авиационного измерителя крутящего момента ("ИКМ"), установленного на пульте оператора.

Параметры струи в начальном сечении определяли при работе двигателя установки на режимах 0,4; 0,6; 0,7; 0,85 и 0,9 от номинального. Профиль скорости в начальном сечении струи, создаваемой установкой АИ-20КВ, соответствующий режиму работы двигателя, при котором мощность на валу винта составляет 1990 кВт (0,9 от номинального), показан на рис. 3.8. По скоростному профилю в начальном сечении методом графического интегрирования определялся начальный расход воздуха в струе, средняя скорость по сечению и поправочный коэффициент количества движения. В табл. 3.2 показано, как изменяются средняя скорость и расход воздуха в начальном сечении струи в зависимости от мощности на валу воздушного винта. Параметры, приведенные в таблице 3.2, соответствуют осредненным значениям результатов измерений.

Для определения параметров струй (в начальном сечении) карьерного вентилятора НК-12КВ, имеющего большие размеры рабочего органа (воздушного винта), разработан координатник с дистанционным управлением [192]. Скорость воздуха в каждой точке замера определялась по известной

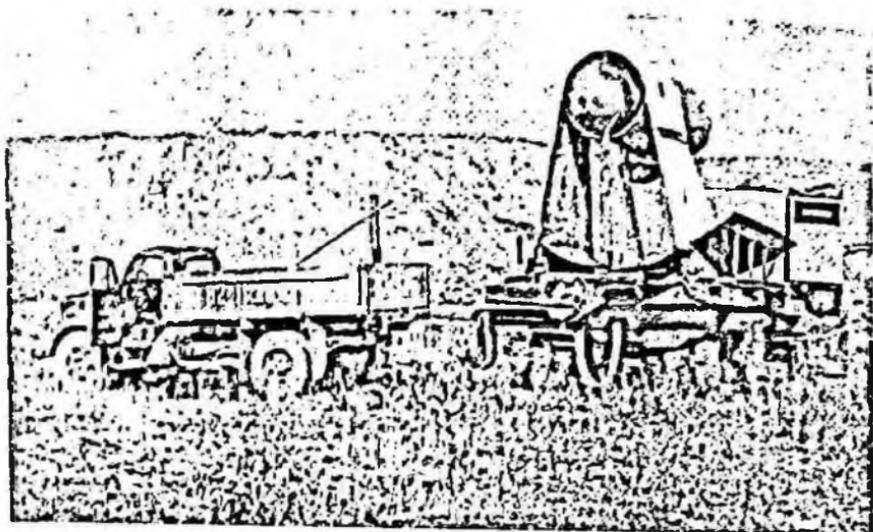


Рис. 3.7. Момент съемки скоростных профилей в начальном сечении струи вентилятора АИ-20КВ

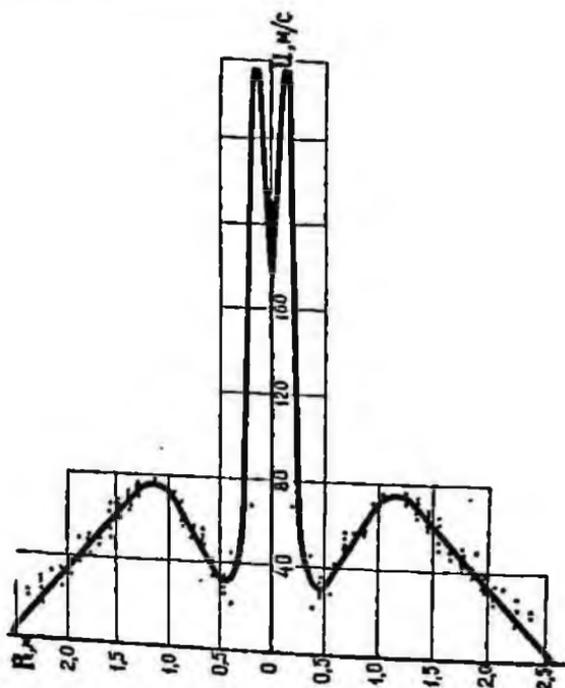


Рис. 3.8. Профиль скорости в начальном сечении струи вентилятора АИ-20КВ.
 $N = 1990$ кВт; $B = 100500$ Н/м²; $t = 28$ °С

Таблица 3.2
 Зависимость средней скорости и расхода воздуха в начальном сечении струи от мощности на валу воздушного винта

Режим работы двигателя по УПРТ, отн. ед.	Мощность, потребляемая винтом, кВт	Средняя скорость по обтекаемой винтом площади, м/с		Начальный расход, м ³ /с
		фактическая	по теории идеального пропеллера	
0,4	640	31,6	26,4	500
0,6	1060	36,4	30,1	576
0,7	1260	37,3	32,0	590
0,85	1780	40,5	35,7	641
0,9	1990	47,4	37	750

методике [193]. Расход воздуха в начальном сечении струи определялся методом графического интегрирования профиля скорости.

Характеристики скорости, снятые в приземном слое струи, создаваемой вентиляторной установкой АИ-20КВ при различной мощности на валу воздушного винта на различных расстояниях и высоте, показаны на рис. 3.9, а результаты замеров приведены в табл. 3.3.

Скорости в настилающейся струе, создаваемой вентиляторной установкой АИ-20КВ (табл. 3.4 и рис. 3.9), были замерены на продолжении оси двигателя, но их нельзя считать осе-

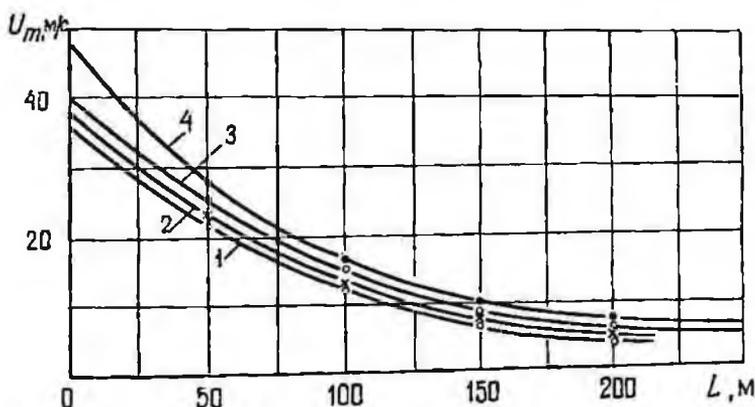


Рис. 3.9. Изменение скорости в настилающейся струе, замеренной на высоте 4 м, в зависимости от расстояния от установки, для мощности на валу воздушного винта 1060; 1260; 1780; 1990 кВт — соответственно, 1; 2; 3; 4

Профили скорости струи

Расстояние от устья струи, м	Высота замера, м	Δh , м	Скорости (м/с)						
			измерено от оси на расстоянии						
			80	60	40	30	20	15	10
100	1	0,246						3,35	7,37
	4	0,246						6,0	16,43
	6	0,246						11,82	17,4
150	2	0,43			3,13	11,13	10,73		7,1
	4	0,43			9,15	3,91	9,43		12,11
	6	0,42			4,7	7,67	11,94		11,81
200	2	1,208	4,13	3,11	3,89		4,27		
	4	1,208	5,56	6,23	6,48		7,12		
	6	1,208	4,43	3,52	4,47		9,29		
250	2	1,81	4,29	3,65	7,06		6,43		
	4	1,81	3,26	4,62	8,62		4,64		
	6	1,81	3,7	5,34	7,83		5,25		

Примечание. 1. Δh — отметка поверхности земли в месте замера относительно уровня стоя-
2. Условия проведения эксперимента: $P_0 = 100500 \text{ Н/м}^2$; $U_0 = 3 \text{ м/с}$; $N = 1990 \text{ кВт}$;

Таблица 3.4

Значения скорости в падающей струе, создаваемой АИ-20КВ,
замеренные на оси струи на высоте 4 м

Мощность на валу плита, кВт	Расстояние от начального сечения струи, м					
	0	50	100	150	200	250
	Замеренная скорость, м/с					
1060	36,4	—	12,1	8,1	4,4	—
1260	37,3	24	13,3	8,6	5,2	—
1780	40,5	—	14,5	9,0	6,0	5,5
1990	47,4	—	15,59	12,11	7,12	6,53

движения воздуха

(м)	По оси	вдоль от оси на расстоянии (м)							
		5	10	15	20	30	40	60	80
15,35	14,71	9,43	5,55	4,18					
15,59	10,1	7,82	4,88	5,66					
15,82	12,13	6,85	5,7	3,95					
	10,45		4,69		3,88	4,78	5,16		
	6,07		10,08		6,3	7,1	6,1		
	6,6		6,27		4,06	5,93	4,29		
	6,57				5,29		3,54	5,4	5,59
	5,24				4,67		4,37	6,65	6,3
	7,61				4,99		4,29	4,71	4,93
	5,29				3,87		4,65	3,96	3,51
	6,53				6,08		4,66	3,96	4,43
	7,35								

ния установки.

 $t = (28 \div 29) ^\circ\text{C}$; $B = 54 \%$.

Таблица 3.5
Начальные условия для расчета траектории струи применительно
к вентиляторным установкам, созданным на базе АГД

Параметр	АИ-20КВ	НК-12КВ	РД-3М
Температура окружающей среды $T_{\text{в}}$, К	293	293	293
Температура газовой смеси (газов) в начальном сечении струи T_0 , К	304,2 (683)	307,4 (673)	755
Средняя скорость в начальном сечении струи U_0 , м/с	40,5	51	—
Скорость реактивной струи в начальном сечении $U_{\text{реак}}$, м/с	180 (200)	360	514
Начальный диаметр струи d_0 , м	4,5	5,6	0,85
Диаметр реактивного сопла d_1 , м	0,54	0,9	—
Начальный расход воздуха в струе воз- душного винта при $N_{\text{в}} = 0,85 N_{\text{ном}}$, кг/с	785	1530	—
Расход газов в начальном сечении реак- тивной струи m_1 , кг/с	20,5	55	160

Результат. т. к. вследствие подогрева струя изгибается. Поэтому все формулы, рассмотренные выше, могут быть применены лишь при условии, что критерий Архимеда в начальном сечении струи равен нулю или близок к нему. Искривление оси струи приводит к уменьшению горизонтальной ее дальности и к снижению эффективности при вентиляции вытянутых в плане карьеров, хотя в ряде случаев искривление оси струи может дать положительный эффект при вентиляции небольших карьеров.

Искривление осей струй, создаваемых вентиляторными установками на базе ТВД, определялось нами путем фотографирования и маркшейдерской съемки струй, задымившихся с помощью дымовых пашек БДШ-15, а также расчетным способом по методикам, предложенным различными авторами [156, 157, 194] (табл. 3.5).

При определении степени искривления оси свободных струй, создаваемых вентиляторными установками на базе ТВД и ТРД, использована методика, изложенная в работе [157]. Расчетная формула

$$\bar{y} = 0,052(\bar{x})^3 \text{Ar}, \quad (3.67)$$

где $\bar{x} = x/d_0(d_1)$ и $\bar{y} = y/d_0(d_1)$ — координаты точек на оси струи.

Температуру смеси в начальном сечении струи определяли по правилу Рихмана

$$T_0 = \frac{c_0 m_0 T_0 + c_1 m_1 T_1}{c_0 m_0 + c_1 m_1}, \quad (3.68)$$

где c_0 и c_1 — соответственно, удельная теплоемкость окружающего воздуха и газов реактивной струи, Дж/(кг К).

При расчете искривления осей настилающихся и наклонных струй были использованы методики, изложенные в работах [157, 194]. Расчетные формулы имеют следующий вид:

1) для настилающихся струй [157]

$$\frac{Z}{H} = 0,4 \left(\frac{X}{H} \right)^{3/2}, \quad (3.69)$$

где X — горизонтальная координата точки на оси струи, м;
 Z — вертикальная координата точки на оси струи, м;

H — геометрическая характеристика, для осесимметричной струи определяется по формуле

$$H = 3,394 \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{T_n}{g} \cdot \frac{U_0 \sqrt{d_0}}{\sqrt{\Delta T}}}, \quad (3.70)$$

где $T_0, T_n, U_0, d_0, \Delta T = T_0 - T_n$ — те же самые параметры, что и в формулах (3.67) и (3.68).

При этом начало координат для осесимметричной настилающей струи, искривление оси которой описывается уравнением (3.69) находится от начального сечения струи на расстоянии $X = 0,35H$ (3.70).

2) для наклонных струй

$$\bar{y} = \pm \bar{x} \operatorname{tg} \beta_0 + 0,02 A r_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \left(\frac{\bar{x}}{\cos \beta_0} \right)^3, \quad (3.71)$$

где β_0 — угол наклона оси струи, рад ($^\circ$);

$A r_0$ — критерий Архимеда, представленный в виде: $A r_0 = \frac{g r_0 (T_0 - T_n)}{U_0^2 T_n}$.

Для струи, направленной вниз, вычисляются параметры:

$$\text{а) } \bar{y}_{\min} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sin^3 \beta_0}{0,06 A r_0}} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \quad \text{— глубина опускания струи, (3.72)}$$

$$\text{б) } \bar{x}_1 = \sqrt{\frac{\sin \beta_0 \cos^2 \beta_0}{0,06 A r_0}} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \quad \text{— значение абсциссы, (3.73)}$$

при котором ордината имеет наименьшее значение;

$$\text{в) } \bar{x}_2 = \sqrt{\frac{\sin \beta_0 \cdot \cos^2 \beta_0}{0,02 A r_0}} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \quad \text{— значение абсциссы, (3.74)}$$

при котором значение ординаты равно нулю.

На рис. 3.10 показаны расчетные траектории осей свободных горизонтальных и наклонных струй, создаваемых вентиляторными установками АИ-20КВ, НК-12КВ и РД-ЗМ. Для наглядности оси ко-

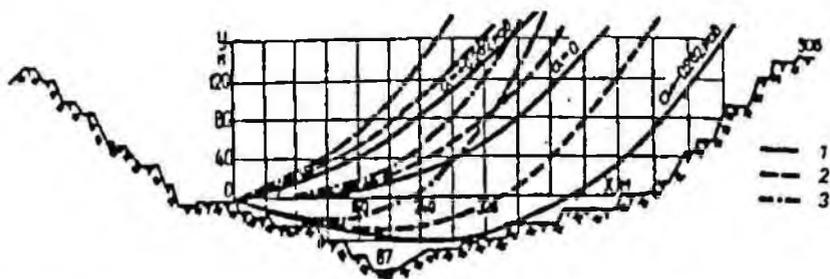


Рис. 3.10. Расчетные кривые осей струй, создаваемых вентиляторами на базе ГТД: НК-12КВ; АИ-20КВ; РД-3М — соответственно, 1, 2 и 3

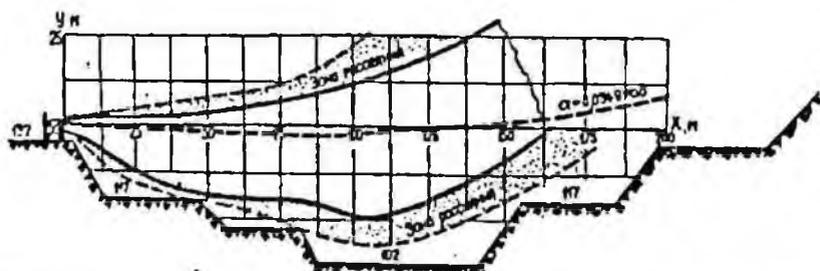


Рис. 3.11. Профиль струи вентилятора АИ-20КВ, распространяющейся в карьерном пространстве

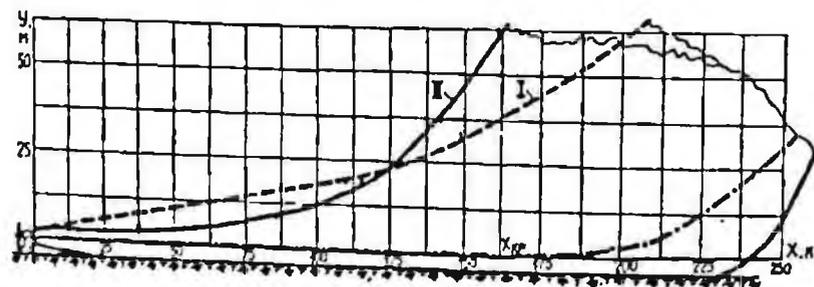


Рис. 3.12. Профиль настилающей струи, создаваемой вентилятором АИ-20КВ

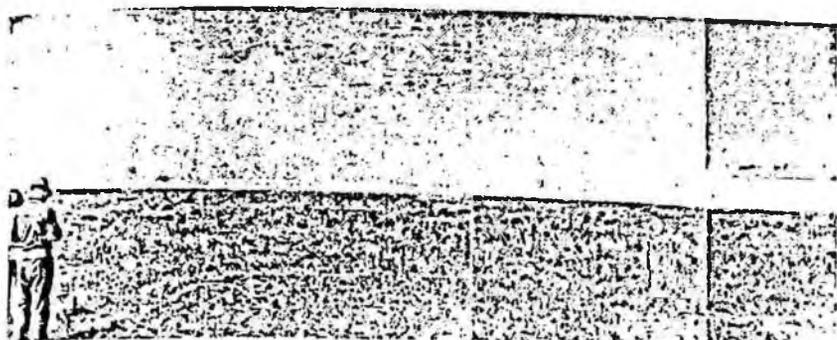


Рис. 3.13. Визуализация настилающейся струи, создаваемой вентилятором

ординат совмещены с профилем Центрального карьера ГБРУ. Эксперименты по съемке профилей задымленных свободных струй были проведены на Центральном карьере Гороблагодатского рудоуправления в январе 1969 г.; съемка профиля настилающейся струи была произведена на ровной площадке в районе Сарбайского карьера ССГОКа. Экспериментально полученные профили свободной и настилающейся струй, создаваемых вентиляторной установкой АИ-20КВ, с наложенными на них расчетными кривыми осей струй показаны на рис. 3.11 и 3.12. Панорамный снимок настилающейся задымленной струи АИ-20КВ показан на рис. 3.13.

3.5. Параметры воздушно-водяных (двухфазных) струй

Основные закономерности воздушно-водяных (двухфазных) струй

Созданные на базе турбовинтовых двигателей вентиляторные установки предназначены не только для проветривания застойных зон и карьеров в целом, но и для пылегазоподавления после массовых взрывов и создания нормального микроклимата с помощью водовоздушных струй.

Воздушно-водяные струи, создаваемые вентиляторами на базе турбовинтовых двигателей, представляют собой типичный пример двухфазных струй, состоящих из смеси воздуха и капель воды. Начальные весовые концентрации воды (примеси) по отношению к воздуху составляют (1,5—3) %. Движение капель воды в струе в основном подчиняется законам движения воздуха, т. е. скорость их движения близка к скорости воздуха [157], поэтому при теоретическом исследовании воздушно-водяные струи можно рассматривать как воздушные с внесением соответствующих поправок.

Определим, как влияет наличие распределенных по сечению струи капель жидкости на характер развития струи. Условие сохранения суммарного количества движения для воздушно-водяной струи запишется в следующем виде:

$$\int_0^F \rho_v U^2 (1 + \chi) dF = J_0, \quad (3.75)$$

$$J_0 = \frac{G_v}{g} U_v + \frac{G_n}{g} U_n, \quad (3.76)$$

где χ и U — местная концентрация примеси (воды) и скорость в произвольной точке струи; G_v и G_n — начальные весовые расходы воздуха и примеси; ρ_v и ρ_n — плотности воздуха и примеси; dF — элемент площади сечения струи.

Для струи круглого сечения $F = \pi r$, $dF = 2\pi r dy = \pi r^2 \xi d\xi$, причем $\xi = y/r$ — безразмерная координата (y — текущий радиус точки, r — радиус сечения струи). Если плотность воздуха в струе постоянна, то из (3.75) имеем

$$\rho_n U_n^2 F \cdot 2 \int_0^1 \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 (1 + \chi) \xi d\xi = J_0. \quad (3.77)$$

Интеграл, стоящий в левой части выражения, может быть представлен в виде суммы двух интегралов

$$2 \int_0^1 \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 (1 + \chi) \xi d\xi = 2 \int_0^1 \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \xi d\xi + 2 \chi_m \int_0^1 \frac{\chi}{\chi_m} \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \xi d\xi, \quad (3.78)$$

здесь χ_m — концентрация примеси на оси текущего сечения струи.

Исходя из предположения, что профили скорости и концентрации тяжелой примеси в поперечном сечении струи выражаются теми же универсальными зависимостями, что и в однофазных струях,

$$\left. \begin{aligned} \frac{U}{U_m} &= (1 - \xi^{1.5})^2 \\ \frac{\chi}{\chi_m} &= 1 - \xi^{1.5} \end{aligned} \right\}. \quad (3.79)$$

В работе [157] приводятся вычисленные значения обоих интегралов.

$$A_2 = 2 \int_0^1 \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \xi_2 d\xi_2 = 0,134;$$

$$C_2 = 2 \int \frac{\chi}{\chi_m} \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \xi_2 d\xi_2 = 0,108.$$

В связи с тем, что начальная скорость истечения воды из кольцевого насадка в 60 раз меньше скорости газов, истекающих из реактивного сопла ($U_n = 3 \text{ м/с} \ll U_n = 180 \div 200 \text{ м/с}$), принимаем $U_n = 0$. В этом случае характерная начальная скорость определяется из условия сохранения количества движения (предполагается, что после смешения скорость примеси равна скорости воздуха)

$$\frac{G_n U_n}{g} = \frac{G_n + G_a}{g} U_0. \quad (3.80)$$

Отсюда $U_0 = U_n / (1 + \chi_0)$.

Так как объемная концентрация воды мала и объемный расход смеси практически не отличается от объемного расхода воздуха, начальное сечение струи смеси должно быть несколько больше сечения воздушного сопла:

$$F_0 = F_n \frac{U_n}{U_0} = F_n (1 + \chi_0), \quad (3.81)$$

т. е. подмешивание к потоку воздуха тяжелой примеси, начальная скорость которой мала или равна нулю, ведет к уменьшению начальной скорости и увеличению начального сечения струи. Здесь χ_0 — начальная концентрация примеси:

$$\chi_0 = \frac{G_n}{G_a}. \quad (3.82)$$

Начальный радиус струи из (3.81)

$$r_0 = r_n \sqrt{1 + \chi_0}. \quad (3.83)$$

Определив U_0 и r_0 из (3.80) и (3.83), для расчетов можно пользоваться формулой, связывающей радиус двухфазной затопленной струи с расстоянием от полюса основного участка, представленной в следующем виде:

$$0,22(\bar{x} - \bar{x}_0) = \bar{r} + \frac{x_0}{\sqrt{1+x_0}} \left\{ \ln 1,22\bar{r} \frac{\sqrt{1+x_0}}{x_0} + \sqrt{1+1,48\bar{r}^2 \frac{1+x_0}{x_0}} - \right. \\ \left. - 0,25 \operatorname{arctg} \left[\frac{1,28\bar{r} \sqrt{1+x_0} \sqrt{1+1,48\bar{r}^2 \frac{1+x_0}{x_0}} - 0,24}{x_0 \sqrt{-1+1,48\bar{r}^2 \frac{1+x_0}{x_0} + 0,31\bar{r}^2 \frac{1+x_0}{x_0}}} \right] \right\}. \quad (3.84)$$

Из опытов Трюппеля и Пабста [157] следует, что в случае затопленной осесимметричной струи полюс основного участка помещается приблизительно в начальном сечении струи, т. е. $x_0 = 0$. В этом случае левая часть уравнения принимает вид: $0,22\bar{x}$.

Величина осевой скорости может быть определена из формулы

$$\bar{U}_m = 2,25 \frac{jS}{\bar{r}^2} \left(\sqrt{1+1,5 \frac{\bar{r}^2}{jS^2}} - 1 \right), \quad (3.85)$$

где $j = J_0/\rho_a U_0^2 F$; $S = G_0 U_0 / J_0 q$.

Концентрация примеси на оси струи вычисляется по формуле

$$\chi_m = \frac{0,75 \bar{U}_m}{\frac{1}{S} - 0,6 \bar{U}_m}. \quad (3.86)$$

При оборудовании установки водяной системой был принят бесфорсуночный способ распыления воды при введении ее в струю газов с помощью специального щелевого насадка (рис. 3.14).

Для подачи воды возможно использование любых насосов производительностью $(2,78 \div 4,16) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

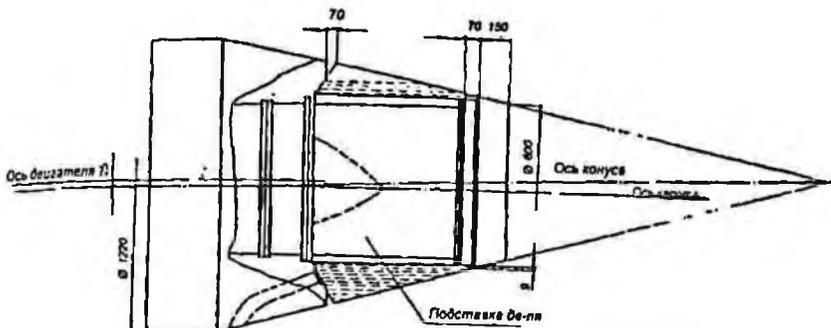


Рис. 3.14. Гидравлическое сопло вентилятора АИ-20КВ

Распыление воды происходит за счет энергии высокоскоростной реактивной струи, (пневматическое распыление), а перенос ее газоздушных струей. Применение специальных распылителей в нашем случае нецелесообразно, так как все они отличаются повышенной сложностью конструкции (центробежные форсунки; дисковые, электростатические и акустические распылители) и рассчитаны на относительно небольшой расход жидкости.

Теоретические аспекты пневматического распыления жидкости

Процесс пневматического распыления жидкости достаточно сложен, и его механизм еще полностью не исследован. Ряд исследователей, занимавшихся изучением этого процесса, отмечает, что в ходе дробления жидкой струи под действием газового потока можно выделить три стадии. В первый момент на поверхности жидкости возникают небольшие возмущения в виде местных пульсаций. Под действием аэродинамических сил эти поверхности возмущения развиваются далее, и из жидкости начинают вытягиваться отдельные нити, которые распадаются затем под действием поверхностного натяжения на отдельные капельки. По теории Кастльмена [195], с повышением скорости воздуха диаметр жидких нитей достигает предела, при которых они распадаются практически уже в момент их образования. Для вычисления скорости распада жидких нитей под действием поверхностных возмущений можно, следуя Кастльмену, воспользоваться выражением

$$\alpha = \alpha_0 \cdot e^{\alpha'}, \quad (3.87)$$

где α , α_0 — амплитуды пульсации в начальный момент и в момент t .

Наивысшая скорость разрыва нитей достигается при максимальной величине параметра

$$q = \left(\frac{8\sigma}{\rho D^3} \right)^{1/3} F, \quad (3.88)$$

где σ — поверхностное натяжение; ρ — плотность жидкости; D — диаметр нити; F — безразмерная функция отношения длины нити к ее диаметру, которое мы обозначим буквой Z .

$F_{\max} = 0,343$ достигается при $Z = 4,5$, и если из нити диаметром D образуется капля с диаметром d , то $D = \left(\frac{2}{3Z} \right)^{1/3} d = 0,53d$. Так,

при $d = 10$ мкм $D = 5,5$ мкм и для воды при 20°C $q = 6,8 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Учитывая, что нить распадается при амплитуде $\alpha \approx 26,5 \cdot 10^{-6}$ м, а $d_{\text{ин}}$ очевидно, не может быть существенно меньше 10^{-9} м, то из формулы (3.87) следует, что верхний предел времени распада водяной нити составляет $t = 1,5 \cdot 10^{-5}$ с.

Таким образом, время образования водяных капелек при пневматическом распылении ничтожно мало и для каплей диаметром 10 мкм имеет порядок 10^{-5} с.

Как показали исследования Лейна [195], капли образуются не только из нитей, но и из растягивающихся и лопающихся тонких жидких пленок. Капля, обдуваемая стационарным потоком воздуха со скоростью, достаточной для ее разрыва, сплющивается аэродинамическим давлением и принимает сначала форму блюдца, а затем раздувается в мешочек. Последний лопается и образуется ливень из очень мелких капелек. Оставшаяся жидкая пленка распадается затем на значительно более крупные капли (рис. 3.15). Если капля внезапно попадает в воздушный поток, скорость которого значительно больше критической, то мешочка не образуется; вместо этого с поверхности сплюсненной капли сдувается тонкий слой, распадающийся на очень мелкие капельки (рис. 3.16).

Если пренебречь влиянием вязкости, то необходимую для распада капли критическую скорость воздуха можно определить, приравнявая аэродинамическое давление в точке застоя капли давлению, вызванному поверхностным натяжением:

$$Kp \sqrt{2(U - V)^2} = 4\sigma/d, \quad (3.89)$$

где U — скорость воздуха, м/с;

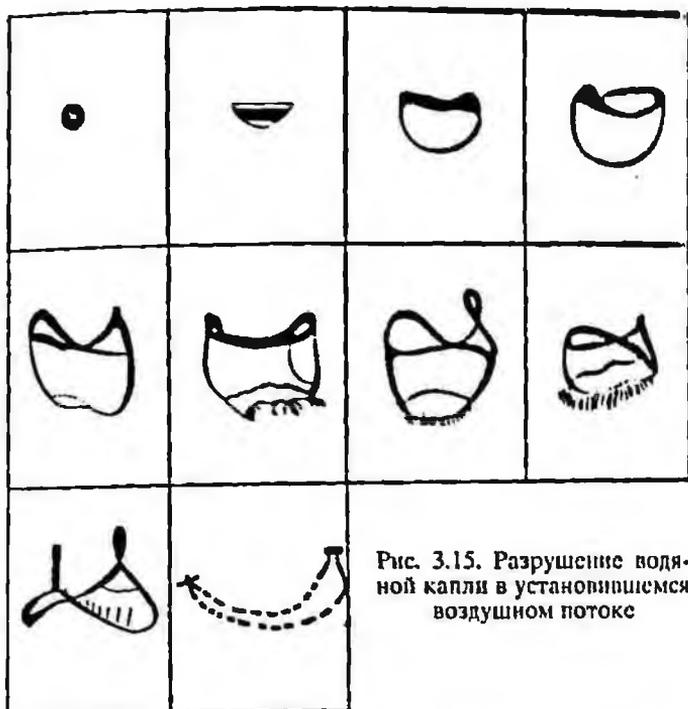


Рис. 3.15. Разрушение водяной капли в установившемся воздушном потоке

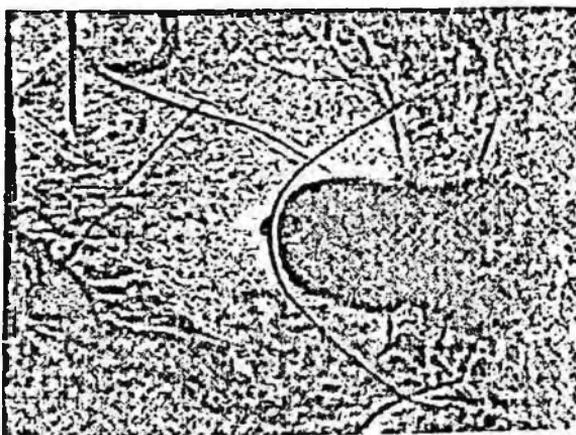


Рис. 3.16. Разрушение водяной капли в неустановившемся воздушном потоке

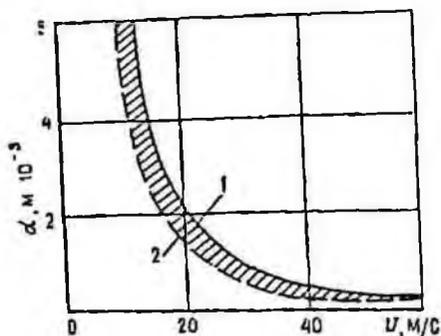


Рис. 3.17. Кривые устойчивости капель, движущихся в воздухе:
1 — верхний предел устойчивости капель ($U = U_{кр}$); 2 — нижний предел устойчивости капель ($U = U_0$)

V — скорость увлекаемой им капль в момент распада, м/с;

$\rho_{в}$ — плотность воздуха, кг/м³;

d — диаметр капль, м;

σ — поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

K — константа, определяемая экспериментально, так как коэффициент лобового сопротивления для деформированной капль в момент ее распада неизвестен.

Под критической скоростью газовоздушного потока понимается такая скорость $U_{кр}$, которая является верхним пределом устойчивости капль. Скорость U_0 определяет нижний предел устойчивости, после которого начинается дробление капль воды [196]. На рис. 3.17 показаны кривые устойчивости водяных капль, движущихся в воздухе. Точки в заштрихованной области соответствуют режимам конечной вероятности распада капль. Исследуя распад крупных капль воды в стационарном воздушном потоке, Лейн [195] нашел следующее условие распада:

$$(U - V)^2 d = 6,12 \cdot 10^3. \quad (3.90)$$

Если эта зависимость справедлива в широком диапазоне размеров капль, то при относительной скорости капль и воздуха, равной скорости звука, будут распадаться лишь капль диаметром ≥ 5 мк.

Говоря о пневматическом распылении водяных струй и капль, нужно иметь в виду, что дисперсность жидкости (в нашем случае воды) зависит от условий работы распылителей и физических свойств жидкости.

На основании большого количества опытов с пневматическими распылителями Нукияма и Танасава [195] получили эмпирическую зависимость для среднего диаметра капль тумана.

$$d_0 = \frac{585}{U - V} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,5} + 597 \left(\frac{h}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0,45} \left(1000 \frac{Q_*}{Q_n} \right)^{1,5}, \quad (3.91)$$

где $d_0 = \frac{\sum x^3 \delta \eta}{\sum x^2 \delta \eta}$ — средний объемно-инерционный диаметр

капель, мм;

U — скорость воздуха, м/с;

V — скорость жидкости, м/с;

σ — поверхностное натяжение, Дин/см;

ρ — плотность, кг/м³;

η — вязкость жидкости;

$Q_{ж}/Q_{г}$ — отношение объемных скоростей жидкости и воздуха.

Таким образом, анализируя формулу (3.91), можно сделать вывод о том, что при использовании ТВД для создания водо-воздушных струй при $U = \text{const}$ (скорость истечения газом реактивной струи) на расчетном режиме, можно получить большой диапазон значений d_0 при выбранных отношениях $Q_{ж}/Q_{г}$. Поэтому любой эксперимент по определению дисперсного состава капли, водовоздушной струй будет частным примером для данного значения отношения $Q_{ж}/Q_{г}$.

Исследование дисперсного состава капель воздушно-водяных струй

Для оценки эффективности воздушно-водяной струи как гидрофилтра нами были проведены эксперименты по определению дисперсности водяных капель. Как показал анализ различных способов определения дисперсности капель [197], наиболее приемлемым, по нашему мнению, для проведения экспериментов в полевых условиях, является способ улавливания капель на пластинку, покрытую сажой. Сущность этого способа заключается в следующем. В поток, несущий капли жидкости (воздушно-водяная струя), вносится стеклянная пластинка, покрытая слоем сажи с напыленной на сажу окисью магния. Капли, попавшие на пластинку, разрушают слой окиси магния и образуют кратеры в слое сажи. На белой, запыленной окисью магния поверхности, отчетливо видны черные отпечатки, образованные каплями. По этим отпечаткам можно судить о размерах капель. Стокер получил эмпирическую формулу, связывающую диаметр отпечатка d' с диаметром d капли, в виде

$$d'/d = 0,77We^{1/5}, \quad (3.92)$$

$$\text{где } We = \rho \frac{dU}{\sigma} \text{ — критерий Вебера;} \quad (3.93)$$

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды;

$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ — поверхностное натяжение воды;

U — скорость движения капли перед соударением, м/с.

При проведении промышленных испытаний нами были поставлены эксперименты по определению дисперсности капель воды методом улавливания на пластинку, покрытую сажой. Дисперсность капель определялась при различных значениях $Q_{ж}/Q_a$ на расстоянии 150 м от начального сечения воздушно-водяной струи при $Q_a = 40 \text{ м/с}$. Данные замеров приведены в табл. 3.6.

При определении размеров капель следует учитывать фактор испарения при обдувании капель воздухом. На основе теоретического анализа, подтвержденного измерением скорости уменьшения диаметра капель, обдуваемых с различной скоростью газо-воздушным потоком, скорость испарения рекомендуется определить по формуле [195]:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r D (c - c_0) [1 + \alpha (\text{Re})^{1/2}], \quad (3.94)$$

где D — коэффициент диффузии пара;

c — концентрация пара в окружающем воздухе;

c_0 — концентрация пара у поверхности капли;

α — константа, характеризующая испаряющееся вещество;

r — радиус капли, мкм;

$a = 0,276(\nu/D)^{1/3}$, где ν — кинематическая вязкость воздуха.

Для воды $a \approx 0,3$.

Из анализа формулы (3.94) можно сделать вывод, что явление испарения водяных капель, обдуваемых газо-воздушным потоком и выпадающих из воздушно-водяной струи, определяется многими факторами: дефицитом влажности в воздухе, наличием примесей в воде, температурой воды и воздуха, размером капель, плотностью капель в воздушно-водяной струе, скоростью и высотой падения капель.

Как показали результаты исследований [198], испарение значительно при мелких каплях $d < 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, и резко уменьшается при увеличении диаметра капель до $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Например, при падении капель с высоты 12 м и высокой влажности воздуха испарение дождя достигает 50 %, в то время, как при тех же условиях, но диаметре капель 1,5 мм испарение не превышает 5 %. Таким образом, для уменьшения испарения необходимо создавать соотношение $Q_{ж}/Q_a = 12,2 \cdot 10^{-4}$, чтобы получить значение $d_0 = 1 \cdot 1,5 \text{ мм}$ (см. формулу (3.91)).

Таблица 3.6
 Дисперсный состав капель в контрольном сечении
 при различных значениях Q_2/Q_1

Размер отпечатка капли на пластинке, мкм	Соотношение Q_2/Q_1					
	$9,75 \cdot 10^{-1}$		$6,16 \cdot 10^{-1}$		$3,42 \cdot 10^{-1}$	
	Скорость воздуха в точке замера, м/с					
	10,0		11,6		17,2	
	Истинные размеры (мкм) и количество капель (%)					
	мкм	%	мкм	%	мкм	%
75	27,9	0,85	26,56	1,366	23,3	0,515
150	49,75	23,0	47,3	10,45	41,46	51,9
225	69,7	15,75	66,34	5,92	58,1	15,98
500	88,6	11,05	84,3	14,55	73,86	17,6
575	106,8	10,63	101,5	11,81	88,96	5,68
450	124,3	9,8	118,2	10,45	103,8	12,36
525	141,4	2,56	134,4	4,09	117,8	3,09
600	158,0	8,51	150,9	11,36	131,6	5,15
675	174,2	1,275	165,7	5,634	145,2	2,06
750	190,2	3,83	180,9	9,56	158,5	2,06
825	206,0	0,85	195,9	3,18	171,6	1,545
900	221,4	2,56	210,6	4,09	184,5	0,515
975	236,7	0,42	225,1	1,366	197,2	1,03
1050	251,8	1,275	239,5	2,27	209,8	0,515
1125	266,7	1,275	253,7	0,454	222,2	—
1200	281,4	2,56	267,7	2,724	234,5	—
1275	296,0	—	281,5	—	246,7	—
1350	310,3	0,42	295,2	0,454	258,7	—
1425	324,7	—	308,9	0,454	270,6	—
1500	338,9	1,275	322,5	0,454	282,4	—
1575	353,0	0,42	335,7	0,91	294,2	—
1650	366,9	—	348,9	0,454	305,8	—
1800	394,6	0,85	375,5	—	328,8	—
1950	421,7	—	401,2	—	351,2	—
2025	454,7	—	413,4	—	362,2	—
2100	448,5	0,42	426,7	—	373,7	—
2400	501,4	0,42	476,8	—	417,8	—
$d_0 = \left(\frac{\sum n d^3}{\sum n} \right)^{1/3}$	175		162		94,7	

В силу того, что пневматический способ распыления дает полдисперсную структуру водо-воздушной струи, значительное количество капель в процессе полета испаряется. Но в нашем случае нельзя считать испарившуюся воду потерянной, так как применение воздушно-водяных струй преследует не только цели пыле- и газоподавления, но и создание комфортных условий на рабочих местах в карьере, что и достигается за счет процесса испарения влаги в струе.

Результаты экспериментов по определению коэффициента равномерности выпадения воды из струи

В качестве основного критерия оценки работы воздушно-водяной струи при орошении застойных зон был принят коэффициент равномерности распределения выпавшей воды K_p на орошаемую площадь. Для его определения необходимо знать величину интенсивности q выпадения водяных капель из водо-воздушной струи. При определении значений q и K_p за основу была принята одна из методик, применяемых при гидравлических испытаниях дождевальных машин [199].

Имеется несколько понятий интенсивности выпадения капель из воздушно-водяной струи: истинная, средняя и по орошаемой площади.

Истинной интенсивностью q выпадения воды в точке на поверхности площадки следует называть отношение приращения слоя выпавшей воды dh к приращению времени dt :

$$q = dh/dt. \quad (3.95)$$

Истинная интенсивность может зависеть также от координат x и y рассматриваемой точки. В общем случае

$$q = f(x, y, t). \quad (3.96)$$

В том случае, когда истинная интенсивность не зависит от времени (установившейся процесс дождевания), ее величину с довольно большой точностью можно определить опытным путем при помощи дождемерных сосудов.

Кроме истинной интенсивности, обычно вводится понятие средней интенсивности q_{cp} , под которой понимается отношение среднего слоя осадков h_{cp} , выпавших на определенной площади F в течение времени t :

$$q_{cp} = h_{cp}/t. \quad (3.97)$$

Количество выпавшей воды $W = h_{\text{ср}}F$, тогда

$$q_{\text{ср}} = W/tF. \quad (3.98)$$

Но так как $W/t = Q$, где Q — секундный расход воды, вводимой в газо-воздушную струю, то

$$q_{\text{ср}} = Q/F. \quad (3.99)$$

Интенсивность q находится делением количества воды W в дождемере на площадь f его открытой верхней части и время дождевания t , с:

$$q = W/tf. \quad (3.100)$$

Зная время дождевания t и площадь f открытой части дождемера, выраженные (3.100) можно переписать в виде

$$q = kW, \quad (3.101)$$

где $k = 1/ft$ является величиной, на которую достаточно умножить любой объем воды, попавшей в дождемер, чтобы вычислить интенсивность в данной точке.

После определения средней интенсивности $q_{\text{ср}}$ по всей площади захвата и фактически измеренной в различных точках этой площади q_i определяется сумма абсолютных разностей $|q_i - q_{\text{ср}}|$, где q_i — интенсивность, измеренная дождемерами. По сумме $\sum |q_i - q_{\text{ср}}|$ находится среднеарифметическое отклонение фактической интенсивности от общей средней интенсивности

$$|\Delta q_{\text{ср}}| = \frac{\sum |q_i - q_{\text{ср}}|}{n}, \quad (3.102)$$

где n — число дождемеров или число разностей.

Чем ровнее слой воды, выпадающей при дождевании на поверхность, тем меньше будет среднее отклонение и выше коэффициент равномерности K_p , определяемый по формуле

$$K_p = q_{\text{ср}} / (q_{\text{ср}} + |\Delta q_{\text{ср}}|). \quad (3.103)$$

Интенсивность дождя по орошаемой площади определялась с помощью дождемерных сосудов через 10 м по оси и 5° между лучами, имеющих диаметр 0,3 м и высоту 0,1 м.

При проведении экспериментов была принята радиально-лучевая схема расстановки дождемерных сосудов через 10 м по оси и 5° между лучами, являющаяся наиболее простой и удобной при

Таблица 3.7

Результаты обработки экспериментальных данных

Номер эксперимента	Расход воды в струе Q_0 , м ³ /с	Продолжительность эксперимента t , с	Ориазная площадь F , м ²	Коэффициент равномерности выпадения воды из струи	% испарившейся воды
I	0,0391	1802	11670	0,515	39,2
II	0,0387	1514	11885	0,515	42
III	0,0353	1796	13320	0,492	—
IV	0,0284	960	13105	0,497	32,8
V	0,01355	1804	5085	0,418	—

орошении больших площадей с помощью воздушно-водяных струй.

Эксперименты по определению коэффициента K_p были проведены при различных расходах воды в сравнительно близких метеорологических условиях. Как показали результаты обработки материалов экспериментов (табл. 3.7), значения коэффициента K_p находятся в пределах 0,418—0,515 при расходах воды 0,011355—0,0391 м³/с.

По полученным значениям коэффициента K_p можно сделать вывод о том, что выпадение водяных капель из воздушно-водяной струи отличается значительной неравномерностью, так как в случае абсолютной равномерности выпадения капель из струи $K_p = 1$ (рис. 3.18).

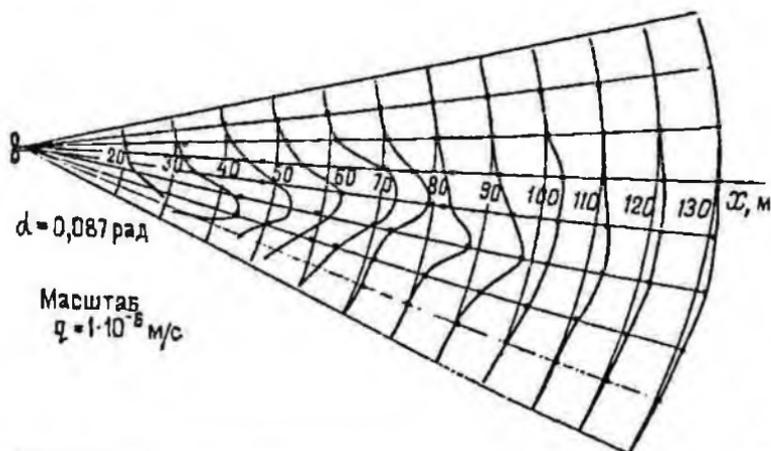


Рис. 3.18. Интенсивность выпадения капель из воздушно-водяной струи $q = f(R, d)$

ГЛАВА 4

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В КАРЬЕРАХ

4.1. Исследование эффективности схем искусственной вентиляции карьеров методом физического моделирования (на примере карьера "Мурунтау")

Экологическая оценка технологического комплекса карьера

Определение количества вредных примесей, выделяющихся
при производстве массовых взрывов в карьере

Количество вредных примесей в пылегазовом облаке (ПГО)
можно рассчитать по формулам

$$M_{\text{ПГО}} = C_n V_0 Z, \quad (4.1)$$

$$M_{\text{СОПГО}} = q_{\text{СО}} M_{\text{ВВЕ}}, \quad (4.2)$$

$$M_{\text{NO}_x \text{ ПГО}} = q_{\text{NO}_x} M_{\text{ВВЕ}}, \quad (4.3)$$

где $q_{\text{СО}} = (9,1 \div 68,0)$ кг/кг ВВ — удельное выделение окиси углерода [2];

$q_{\text{NO}_x} = (3,2 \div 12,15)$ кг/кг ВВ — удельное выделение окислов азота;

$M_{\text{ВВЕ}}$ — суммарное количество ВВ, необходимое для выполнения производственного плана, кг;

$C_n = (0,79 \div 4,25) \cdot 10^{-3}$ кг/м³ — концентрация пыли в ПГО, определяется свойствами горных пород и ВВ;

V_0 — объем ПГО, м³;

Z — режим производства массовых взрывов (количество взрывов в году).

Расчет параметров, входящих в формулы (4.1)—(4.4), выполнен по методике ВНИИБТГ [1], результаты расчета приведены в табл. 4.1 (в наших расчетах $Z = 104$).

Средняя величина объема единичного ПГО определяется на основе исследований П. В. Бересневича [1] по формуле

$$V_0 = 4,4 \cdot 10^4 M_{\text{ВВ}}^{1,08}, \quad (4.4)$$

где $M_{\text{ВВ}}$ — среднее количество ВВ на единичный массовый взрыв, т.

Таблица 4.1
 Результаты расчета по формулам (4.1)—(4.7)

Показатель	Этап отработки карьера		
	I	II	III
Производительность карьера по горной массе, $\text{м}^3 \cdot 10^6$	41,8	52,1	17,7
Суммарная масса ВВ, т	27200	34000	11500
Объем единичного пылегазового облака, $\text{м}^3 \cdot 10^6$	18,4	23,0	7,15
Масса единичного массового взрыва, т	262	325	110
Масса выделяющейся окиси углерода, т	248000	310000	105000
Масса выделяющихся окислов азота, т	87000	108000	37000
Валовый выброс пыли, т	4780	6000	1860
Приведенный валовый выброс вредных примесей, усл. т $\cdot 10^6$	4,82	5,96	2,04
Остаточное количество вредных примесей, усл. т $\cdot 10^3$	48,2	59,6	20,4

Величина $M_{\text{ВВ}}$ определяется по формуле

$$M_{\text{ВВ}} = \frac{M_{\text{ВВ}}}{Z} = \frac{Aq_{\text{ВВ}}}{Z}, \quad (4.5)$$

$q_{\text{ВВ}}$ — удельный расход ВВ, $\text{кг}/\text{м}^3$;

A — производительность карьера по горной массе, м^3 .

Значение приведенной массы годового выброса от ПГО в атмосферу можно определить по формуле

$$\bar{M}_{\text{ВВ}} = 1,2 \sum_{j=1}^n M_{j\text{ВВ}} a_j, \quad (4.6)$$

$M_{j\text{ВВ}}$ — масса годового выброса примеси j -го типа, т/год;

a_j — показатель относительной агрессивности;

1, 2 — коэффициент, учитывающий степень засушливости района (количество осадков 400 мм/год).

Значения a_j следующие:

$$a_{\text{CO}} = 1,0; a_{\text{NO}_x} = 41,1; a_{\text{сажн}} = 41,1;$$

$$a_{\text{в}} \approx a_{\text{сажн}} = 41,5; a_{\text{C}_2\text{H}_2\text{н}} = 1,26 \div 3,16.$$

Довольно высокую эффективность ($\eta = 85 \div 90 \%$) обеспечивают следующие технологические мероприятия, предотвращаю-

щие выброс вредных примесей в окружающую среду: уменьшение диаметра скважин при увеличении их глубины, использование воздушных промежутков в скважинах, увеличение высоты уступов, внешняя и внутренняя забойки скважин, производство взрывов в зажатой среде на неубранную горную массу. За счет этих мероприятий остаточное количество вредных примесей составят

$$\Delta \bar{M}_{\text{пго}} = M - (1 - \eta), \quad (4.7)$$

где η — эффективность технологических мероприятий по пылегазоподавлению при массовых взрывах в карьерах.

Результаты расчетов по формулам (4.1)—(4.7) для карьера представлены в табл. 4.1.

Оценка технологического комплекса карьера как фактора загрязнения окружающей среды

Количество пыли, выделяющейся при работе технологического оборудования, определяется по формуле

$$M_{\text{п}} = 3600 \cdot T_{\text{р}} \cdot F_{\Sigma}, \quad (4.8)$$

где $T_{\text{р}}$ — режимный фонд рабочего времени, ч/год;

F_{Σ} — суммарная интенсивность пылевыведения, кг/с.

Поскольку $T_{\text{р}} = 8160$ ч/год,

$$F_{\Sigma} = 0,037 \text{ кг/с};$$

$$F_{\Sigma\text{II}} = 0,048 \text{ кг/с}; F_{\Sigma\text{III}} = 0,023 \text{ кг/с};$$

$$M_{\text{пI}} = 8160 \cdot 0,037 \cdot 3,600 = 1085 \text{ т};$$

$$M_{\text{пII}} = 8160 \cdot 0,048 \cdot 3,600 = 1400 \text{ т};$$

$$M_{\text{пIII}} = 8160 \cdot 0,023 \cdot 3,600 = 676 \text{ т}.$$

Величина приведенной массы пыли для соответствующих этапов обработки составит:

$$\bar{M}_{\text{пI}} = 1,2 \cdot 41,5 \cdot 1,085 \cdot 10^4 = 5,4 \cdot 10^4 \text{ т},$$

$$\bar{M}_{\text{пII}} = 7 \cdot 10^4 \text{ т},$$

$$\bar{M}_{\text{пIII}} = 3,4 \cdot 10^4 \text{ т}.$$

Рядом исследователей установлено, что при работе ДВС концентрация вредных компонентов в отработавших газах (ОГ) имеет следующие значения (C_j): $\text{NO}_x = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\text{CO} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\text{C}_n\text{H}_{2n} = 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; сажа $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$.

Валовый выброс каждого компонента ОГ можно определить по формуле

$$M_{j\text{ОГ}} = C_j \sum q_{yji} N_i T_p k_{\text{см}i} \quad (4.9)$$

где T_p — режимный фонд рабочего времени, ч/год;

$k_{\text{см}i}$ — среднесменный коэффициент использования рабочего времени;

q_{yji} — удельная интенсивность выделения вредных примесей i -м источником, $\text{м}^3/\text{кВтс}$ (для ДВС $q = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кВтс}$);

N_i — мощность привода i -го типа источника, кВт.

Значение приведенной массы годового выброса вредных примесей с ОГ в атмосферу можно определить по формуле

$$\bar{M}_{\text{ОГ}} = 1,2 \sum M_{j\text{ОГ}} a_j \quad (4.10)$$

В результате расчетов по формулам (4.1)–(4.10) на основе данных табл. 4.1 установлено, что для соответствующих этапов отработки карьера $M_{\text{ОГ I}} = 4438 \text{ С усл. т}$; $M_{\text{ОГ II}} = 58300 \text{ усл. т}$; $M_{\text{ОГ III}} = 23\,700 \text{ усл. т}$.

Суммарный валовый выброс вредных примесей при работе всего технологического комплекса карьера может быть определен по формуле

$$\bar{M}_{\Sigma} = \Delta \bar{M}_{\text{ПГО}} + \bar{M}_{\text{ОГ}} + \bar{M}_{\text{ППГО}} \quad (4.11)$$

В результате расчетов $M_{\Sigma \text{ I}} = 580380 \text{ усл. т}$; $M_{\Sigma \text{ II}} = 724300 \text{ усл. т}$; $M_{\Sigma \text{ III}} = 261700 \text{ усл. т}$.

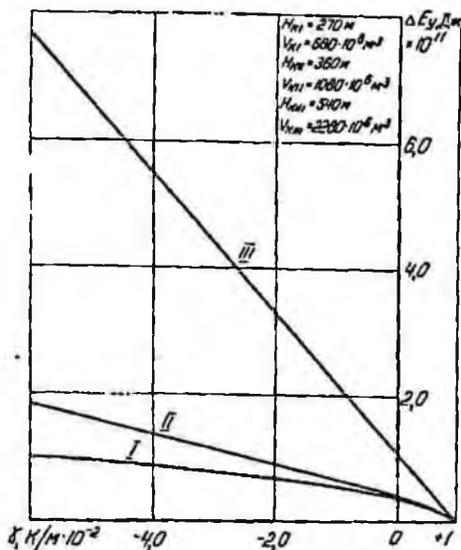
Энергетическая оценка атмосферы карьера и предварительный выбор вентиляционного комплекса карьера

Расчет дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьера при температурных инверсиях

Расчет дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьера (рис. 4.1) выполнен по методике, изложенной в разделе 1.3.

На этапе I отработки глубина карьера по замкнутому контуру $H_{\text{к I}} = 270 \text{ м}$. В результате аппроксимации объема карьера ус-

Рис. 4.1. Оценка дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьера на трех этапах отработки (I—III)



ченным конусом приведенные параметры $r_{0I} = 330 \text{ м}$, $\text{ctg} \alpha_I = 3,81$, объем карьера $V_{KI} = 680 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Для двух остальных этапов отработки: $H_{KII} = 360 \text{ м}$, $H_{KIII} = 540 \text{ м}$; $r_{0II} = 300 \text{ м}$; $r_{0III} = 360 \text{ м}$; $\text{ctg} \alpha_{II} = 3,55$; $\text{ctg} \alpha_{III} = 2,67$; $V_{KII} = 1080 \cdot 10^6 \text{ м}^3$; $V_{KIII} = 2280 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Для всех расчетов $T_0 = 243 \text{ К}$, $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$, $C_v = 1020 \text{ Дж/кг К}$, $R = 287 \text{ Дж/кг К}$, $-0,06 \leq \gamma \leq \gamma_c$.

Так как в периоды инверсий атмосфера карьера оказывается замкнутой, то можно считать, что выделяющаяся при работе средств искусственной вентиляции энергия полностью расходуется на изменение ΔE_y .

При определенном времени работы средств искусственной вентиляции в процессе разрушения температурных инверсий $\tau_{\text{н}} = 1 \div 1,5 \text{ ч}$ количество установок общеобменного проветривания можно ориентировочно определить по формуле

$$Z_{\text{НК}} = \Delta E_y / N_y \tau_{\text{н}}, \quad (4.12)$$

где N_y — единичная мощность одной установки, Дж/ч.

(НК-12КВ — $C_{17} = 2300 \text{ кг/ч}$, $N_y = 10^{11} \text{ Дж/ч}$).

Анализ результатов расчета показал, что при переходе от второго к третьему этапу отработки карьера потребуется 5 НК-12КВ при $\gamma \geq -0,035 \text{ К/м}$. При $\gamma < -0,035 \text{ К/м}$ необходимо на этапе III увеличить количество установок до 8 ($\gamma = -0,06 \text{ К/м}$) либо увеличить при $Z = 5$ время работы до 1,5 ч. При переходе к этапу III отработки целесообразно использовать совместно с вентиляторами НК-12КВ установки АВК-35, что позволит также обойтись без увеличения количества вентиляторов НК-12КВ и времени общеобменного проветривания.

Превварпительный расчет состава
вентиляционного комплекса карьера

Количество воздуха, необходимое для удаления вредных примесей из атмосферы карьера с помощью средств искусственной вентиляции, можно рассчитать по формуле [89]

$$Q_n = \frac{Q_{\Sigma}}{k \left[1 - \bar{c}_n - \frac{1 - \bar{c}_{\text{опт}}}{1 - e^{-k\varphi}} \right]}, \quad (4.13)$$

где Q_{Σ} — суммарная потребность карьера в свежем воздухе по пылегазовому фактору, м³/с; $Q_{\Sigma I} = 36600$ м³/с, $Q_{\Sigma II} = 49000$ м³/с, $Q_{\Sigma III} = 22000$ м³/с;

k — коэффициент эффективности проветривания ($k = 0,3 \div 0,5$);

$\bar{c}_{\text{опт}}$ — оптимальный уровень снижения относительной концентрации в цикле проветривания;

\bar{c}_n — относительная концентрация вредных примесей в воздухе, поступающем в карьер;

$\varphi = Q_n \tau_n / V_k$ — коэффициент обмена;

τ_n — время проветривания, ч;

V_k — объем карьера, м³.

Уравнение решается следующим образом:

а) задаемся значениями $k = 0,3 \div 0,5$, $c_{\text{опт}} = 0,5$; $c_n = 0,15$;

б) из условия $\left[1 - \bar{c}_n - \frac{1 - \bar{c}_{\text{опт}}}{1 - e^{-k\varphi}} \right] > 0$ определяем $\varphi_{кр} >$
 $> -\frac{1}{k} \ln \left(1 - \frac{1 - \bar{c}_{\text{опт}}}{1 - \bar{c}_n} \right)$;

в) определяем по формуле Q_n ;

г) рассчитываем время проветривания

$$\tau_n = \frac{\varphi V_k}{3,6 \cdot 10^3 Q_n} \text{ при } k = 0,5; c_{\text{опт}} = 0,5; c_n = 0,15; \varphi_{кр} = 1,77.$$

Для первого этапа отработки задаемся $\varphi = 3$. Тогда

$$Q_{n1} = \frac{36600}{0,5 \cdot 0,206} = 355 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как $V_{\text{к}} = 680 \cdot 10^6 \text{ м}^3$,

$$\tau_{\text{I}} = \frac{3 \cdot 680 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 3,55 \cdot 10^5} = 1,6 \text{ ч.}$$

Для этапа II $\varphi = 3,25$,

$$Q_{\text{II}} = \frac{49000}{0,5 \cdot 0,227} = 431000 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Так как $V_{\text{к}} = 1080 \cdot 10^6 \text{ м}^3$,

$$\tau_{\text{II}} = \frac{3,25 \cdot 1080 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 4,31 \cdot 10^5} = 2,26 \text{ ч.}$$

На этапе III предположим уменьшение $k = 0,4$ в связи с увеличением глубины карьера и определим $\varphi_{\text{кр}} = 2,218$. Положим $\varphi = 2,9$, тогда $Q_{\text{III}} = 452000 \text{ м}^3$,

$$\tau_{\text{III}} = \frac{2280 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^3 \cdot 4,52 \cdot 10^5} = 4,06 \text{ ч.}$$

На пределе рабочей дальности установки на базе вертолетных винтов имеют следующие расходы воздуха в струях (при $\gamma = -0,05 \text{ К/м}$) УМП-21 $Q_{\text{УМП}} = 12100 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{АВК}} = 55000 \text{ м}^3/\text{с}$, расход в струе НК-12КВ на пределе рабочей дальности составляет $Q_{\text{НК}} = 73 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ (при $U_{\text{ср}} = 0,6 \text{ м/с}$).

Расчетные расходы воздуха $Q_{\text{к}}$ обеспечиваются вентиляционными комплексами, состоящими из установок:

на этапе I 4НК-12КВ + 5УМП-21,

на этапе II 5НК-12КВ + 5УМП-21,

на этапе III 5НК-12КВ + 2АВК-35.

Применение вентиляторов на базе вертолетных винтов необходимо как в периоды штелей с приземными инверсиями — общеобменное проветривание совместно с НК-12КВ, так и в периоды с недостаточной ветровой активностью — в режиме местного проветривания эти установки обеспечивают усреднение концентрации вредных примесей в рабочих зонах карьера. При работе установок на базе вертолетных винтов в режиме местного

проветривания должно соблюдаться условие $\left| \frac{d\bar{c}_{\text{к}}}{d\tau_{\text{мн}}} \right| \geq \left| \frac{d\bar{c}_{\text{к}}}{d\tau_{\text{н}}} \right|$, что

позволяет использовать аккумулирующую способность атмо-

сферы карьера и уменьшить время работы установок НК-12КВ. Для компенсации дефицита энергии неустойчивости в атмосфере карьера при $\gamma = -0,06$ К/м для первого этапа отработки достаточно одного вентилятора-оросителя НК-12КВ-1М, для второго — 2 и для третьего — 8. Однако, учитывая то обстоятельство, что, кроме компенсации дефицита энергии неустойчивости, необходимо обеспечить вынос загрязненного воздуха за пределы атмосферы карьера, возникает необходимость увеличения числа вентиляторных установок и применения комбинированных схем искусственной вентиляции.

Промышленная эксплуатация систем вентиляции ряда карьеров, а также опытная эксплуатация вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М на карьере "Мурунтау" показывают, что для обеспечения вентиляции последнего при неблагоприятных условиях необходимо на первом этапе ($H_k = 270$ м) иметь три вентилятора-оросителя НК-12КВ-1М, два — три вентилятора УМП-21 (один АВК-35), на втором ($H_k = 360$ м) и третьем ($H_k = 540$ м) этапах, соответственно, четыре НК-12КВ-1М и пять УМП-21 (два АВК-35), пять НК-12КВ-1М и пять УМП-21 (два АВК-35).

Выбор рациональных схем вентиляции карьера "Мурунтау" на трех этапах его отработки выполнен методом физического моделирования с соблюдением необходимых критериев подобия.

Методика оценки эффективности схем искусственной вентиляции карьера "Мурунтау"

Гидродинамические и диффузионные процессы, происходящие при искусственном проветривании карьеров, весьма сложны, и теоретический расчет их без проведения предварительных экспериментальных исследований практически невозможен. В связи с этим при моделировании процессов искусственной вентиляции карьеров необходимо соблюдать следующие условия подобия [180, 189, 191]:

а) геометрическое — когда выдерживается постоянным соотношение между сходственными линейными размерами модели и натурального объекта, т. е.

$$L_n/L_m = \text{const}, \quad (4.14)$$

где L — некоторые характерные линейные размеры карьера и вентиляторов, м. Индекс "м" — относится к модели, индекс "н" — к натурным объектам;

б) кинематическое — когда справедливо равенство

$$\left(\frac{U_1}{U_2}\right)_m = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)_n, \quad (4.15)$$

т. е. отношение скоростей в сходственных точках струй натуральных вентиляторов и их имитаторов, ограниченных геометрически подобными поверхностями (в данном случае геометрически подобные поверхности карьера и его модели);

в) динамическое — когда в двух потоках, ограниченных геометрически подобными поверхностями, какие-либо из сил, действующих на сходственные элементы, пропорциональны, т. е.:

$$\left(\frac{P}{F}\right)_m = \left(\frac{P}{F}\right)_n. \quad (4.16)$$

Иначе говоря, отношение работ этих сил должно быть одинаковым на сходственных участках траекторий струй.

В конечном итоге в ряде случаев динамическое подобие при моделировании схем искусственной вентиляции в области автономности может быть сведено к равенству начальных скоростей струй натуральных вентиляторов и их имитаторов $U_n = U_m$;

г) вследствие изменения поля концентраций вредных примесей при проветривании карьеров процесс диффузии является неустановившимся, поэтому определяющим частичное динамическое и диффузионное подобие процессов в модели и натуре является критерий гомохронности

$$Ho = Fo \cdot Pe = \frac{Ut}{L} = \text{const}, \quad (4.17)$$

где U — скорость воздуха в сходственных точках модели и натуре, м/с;

L — характерный линейный размер, м;

t — время процесса, с;

$Fo = L^2/At$ — диффузный критерий Фурье;

$Pe = A/UL$ — диффузный критерий Пекле;

A — коэффициент турбулентной диффузии, м/с.

С учетом того, что $m_t = t_n/t_m$, из формулы (4.17) можно определить временной масштаб протекающих в карьере и его модели диффузионных процессов при искусственной вентиляции.

$$m_t = \frac{t_n}{t_m} = \frac{m_L L_m U_m}{m_u U_m L_m} = \frac{m_L}{m_u} \quad \text{при } m_u = 1 \quad m_t = m_L. \quad (4.18)$$

Для "динамических" схем искусственной вентиляции карьеров — с поступательным или угловым перемещением струй внутри карьерного пространства — критерий гомохронности позволяет определить масштабы скоростей перемещения турбулентных струй.

Для схем с поступательным перемещением

$$\left(\frac{Wt}{L}\right)_m = \left(\frac{Wt}{L}\right)_n, \quad (4.19)$$

где индекс "м" — относится к модели; "н" — относится к натуре;

L — характерный линейный размер, м;

W — скорость поступательного перемещения, м/с;

t — время перемещения, с.

Так как $L_m = m_L L_n$ и $t_m = m_t t_n$, то при $m_L = m_t W_n = W_m$.

Для схем проветривания с угловым перемещением струй критерий гомохронности определяется формулой

$$\left(\frac{U_\tau t}{L^\nu}\right)_m = \left(\frac{U_\tau t}{L^\nu}\right)_n, \quad (4.20)$$

где U_τ — фиктивная касательная скорость точек в сходственных сечениях струй, м/с.

Так как $m_L = m_n$, то по аналогии с (4.19) $(U_\tau)_m = (U_\tau)_n$. Но ввиду того, что $(U_\tau)_m = \omega_m R_m$, $(U_\tau)_n = \omega_n R_n$ и $R_m = R_n m_R - \omega_n = m_\omega \omega_n$, где $R_{(m,n)}$ — радиусы перемещающихся точек в сходственных сечениях струй модели и натуре, м.

Таким образом, угловая скорость сопла имитатора и натурального вентилятора связаны через масштаб угловой скорости перемещения и при $m_n = 1$ $m_\omega = m_R$.

В связи с тем, что при линейном масштабе модели и натуре $m_L = 1/1000, 1/2000$ осуществить равенство критериев Рейнольдса практически невозможно, при моделировании процессов проветривания карьеров достаточно соблюсти геометрическое подобие натуральных объектов и моделей, кинематическое (в автомобильной области) и динамическое подобие струй, создаваемых вентиляторами и их имитаторами.

Исследования эффективности схем проветривания методом физического моделирования производилась на стенде (рис. 4.2) из модели карьера, системы регистрации концентрации дыма в модели, дымового генератора, пневматической системы и вспо-

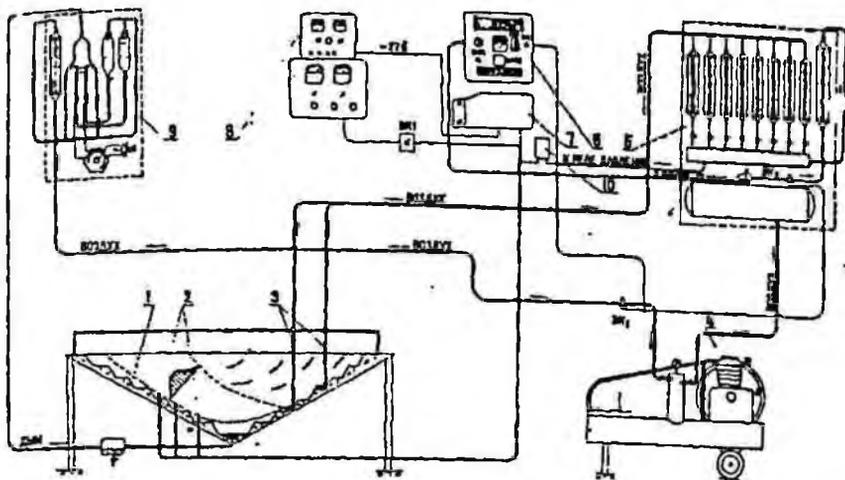


Рис. 4.2. Схема стенда для исследования процессов искусственной вентиляции карьеров

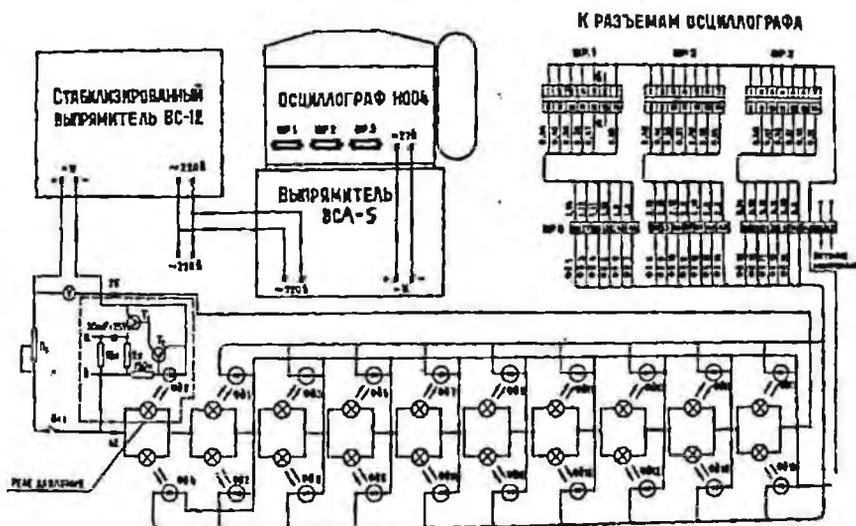


Рис. 4.3. Схема системы регистрации концентрации примесей в модели

могательного оборудования. Модель карьера изготавливается в масштабе 1/2000, 1/1000 или 1/500.

Система регистрации концентрации дыма в модели (рис. 4.3) состоит из 30-канального светолучевого осциллографа НО-10М, питающего его выпрямителя ВСА-5К, комплекта фотодатчиков, равномерно расположенных в модели карьера, и контрольно-измерительных приборов. Датчик представляет собой фотоэлектрический прибор, включающий германиевый фотодиод ФД-3 и миниатюрную лампу накаливания типа Э-45. Питание ламп осуществляется от стабилизированного выпрямителя РС-12, что позволяет поддерживать в процессе эксперимента величину начального светового потока постоянной и исключить возможность модуляции потока остаточной пульсацией выпрямленного напряжения. Принцип работы фотодатчиков изложен в работах [191, 200].

Для облегчения юстировки осциллографа НО-10М в цепи гальванометров включены подстроечные сопротивления. Дымовой генератор 9 (см. рис. 4.2) состоит из камеры смешения, кварцевых трубок с соплами, нагревательных элементов, регулятора напряжения, системы распределения воздуха, маслонасоса мембранного типа и ротаметра типа РС-5 для контроля расхода воздуха. При исследовании схем искусственной вентиляции с выделением вредных примесей уровень их интенсивности поддерживается блоком автоматического регулирования. Пневматическая система (рис. 4.2) включает имитаторы вентиляторных установок 3, компрессор 4, расходомерный блок 5 и систему воздухораспределения. При задымлении модели воздух от компрессора 4 через ротаметр типа РС-5 поступает в смесительную камеру генератора через соединительную трубку в колбы с маслом для компенсации избыточного давления в камере. При проветривании модели воздух от компрессора подается к ресиверу расходомерного блока, затем через редуктор и электромагнитный кран ЭК-2 идет на коллектор, к которому через ротаметры РС-5 подключены имитаторы. Регулирование расхода воздуха на выходе из имитатора осуществляется игольчатými кранами, включенными в систему ротаметров расходомерного блока.

Для моделирования "динамических" схем проветривания с угловым перемещением струй имитатор (рис. 4.4) снабжен двумя подвижными концевыми выключателями и рычагом-прерывателем, установленным на валу приводного механизма. Величина углового перемещения насадка имитатора регулируется за счет

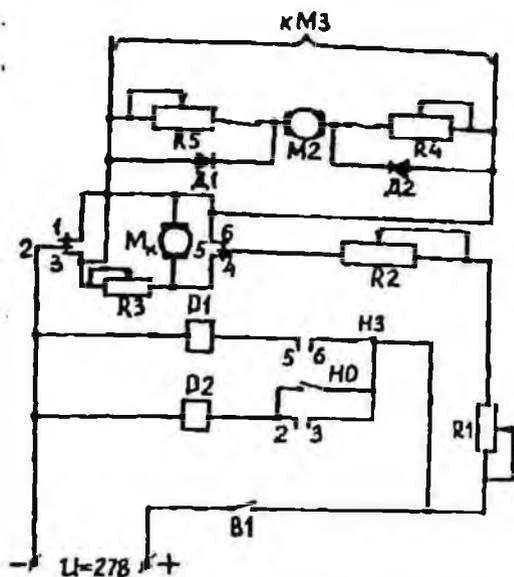


Рис. 4.4. Схема управления скоростью углового перемещения струн

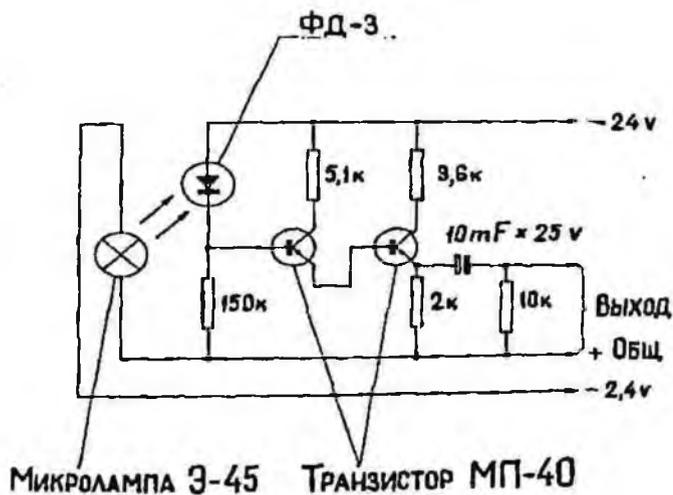


Рис. 4.5. Схема датчика давления

перемещения концевых выключателей по градуированному циферблату. Синхронизация скорости углового перемещения имитаторов обеспечивается регулировкой подстроечных сопротивлений R_1 и R_2 . Начало процесса проветривания модели фиксируется высокочувствительным датчиком давления (рис. 4.5), состоящим из фотоэлектрической пары, усилителя постоянного тока, дифференцирующей цепочки "RC" и пневмомеханической системы реле давления.

При исследовании динамических схем проветривания карьера последовательность выполнения операций на стенде та же, что и для статических схем за исключением того, что настройка имитаторов включает регулировку скорости перемещения их в модели, а включение приводных механизмов осуществляется одновременно с подачей воздуха в имитаторы.

Схемы искусственной вентиляции карьера

Исследование схем вентиляции карьера "Мурунтау" проводились на модели карьера при $m_L = 1 : 2000$ и $m_H = 1$. Пересчет расходов воздуха в струях имитаторов карьерных вентиляторов проводили по формуле

$$m_Q = \frac{Q_H}{Q_H} = m_H m_L^2 \quad (4.21)$$

при $m_H = 1$; $m_Q = m_L$; $Q_{\text{мнк}} = 1,512 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_{\text{мопк}} = 8,8 \text{ м}^3/\text{ч}$; $Q_{\text{мумп}} = 2,27 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Масштаб скорости углового перемещения можно определить на основе теории размерностей.

$$m_\omega = m_H/m_L \text{ при } m_H = 1 \text{ и } m_L = 1/2000 \text{ } m_\omega = 2000. \quad (4.22)$$

Процесс проветривания по какой-либо схеме записывали на осциллограммы, в результате обработки которых получали описание функции безразмерной концентрации примесей в зависимости от времени вентиляции $\bar{C}_K = f(\tau_\omega)$, а также определяли коэффициент эффективности схемы

$$K_\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \Delta \tau_i}{\tau_n} \quad (4.23)$$

где τ_0 — время (в секундах) снижения концентрации примесей в модели до уровня $C_K = 0,05$;

$\Delta\tau_i$ — длительность единичного временного интервала, с;

K_i — эффективность процесса проветривания в i -й интервал времени.

Значение K_i вычисляется по формуле

$$K_i = 1 - \frac{\bar{C}_{K_i}}{C_{K_{i-1}}}, \quad (4.24)$$

где \bar{C}_{K_i} — безразмерная концентрация примесей в i -й промежуток времени;

$C_{K_{i-1}}$ — концентрация примесей в предшествующем интервале.

По физическому смыслу K_i выражает отношение количества вредных примесей, удаленных в i -й промежуток времени, к количеству примесей, находившихся в модели карьера до i -го момента, т. е. является аналогом к. п. д. процесса проветривания.

При лабораторных исследованиях определялась эффективность статических, динамических и комбинированных схем. В качестве генерального направления процесса проветривания с учетом Oroграфии местности, геометрии карьера, а также розы ветров было выбрано СЗ—ЮВ. Повторяемость ветров в направлении СЗ—С—СВ составляет 62 %. В состав вентиляционного комплекса входили установки НК-12КВ, УМП-21 и АВК-35. Количество вентиляторов, входящих в комплекс, определено предварительно на основании результатов расчета дефицита энергии в атмосфере карьера на конец каждого этапа его отработки, т. е. для глубин карьера 300, 400 и 600 м. Сравнительная оценка схем производилась по интегральному показателю $K_{\text{сх}}$, являющемуся аналогом к. п. д. процесса проветривания.

Этап I отработки карьера. На первом этапе в процессе исследований производилась оценка схем проветривания (рис. 4.6) — поперечных параллельно-веерных I_1 , комбинированных I_2 — I_4 , продольно каскадных и параллельно-веерных. Для схем I_1 — I_4 в качестве генерального направления была принята с учетом розы ветров ориентация струй С—Ю. Имитаторы вентиляторов НК-12КВ размещались на отметках ∇ (345÷360) м северного борта карьера, расстояние между установками $\bar{l} = 80$ ($l = 450$ м). Скорость углового перемещения струй имитаторов НК-12КВ варьировалась в диапазоне $\omega_m = 0 \div 6$ рад/с. Угол поворота струй в горизонтальной плоскости $\varphi = 75^\circ$.

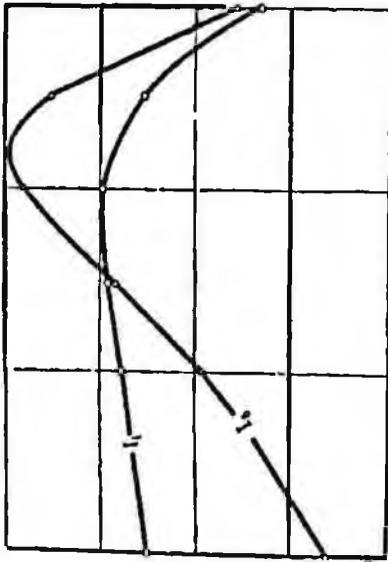
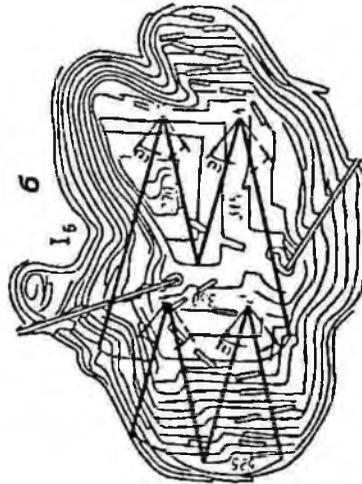
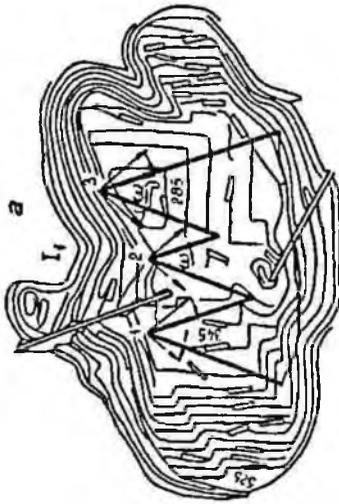


Рис. 4.6. Вентиляция на этапе I отработки карьера:
 а — схема; б — эффективность.



В комбинированных схемах I_2 — I_4 с вентиляторами НК-12КВ использовались установки, создающие вертикальные струи — УМП-21 (АВК-35). Установки УМП-21 располагались на расстоянии $\Gamma = 20$ ($l = 420$ м) на отметках ∇ (345+360) м южного борта. В схеме I_2 импатор АВК-35 (см. рис. 4.6, а) размещался на отметке ∇ 345 м, а в схеме I_4 две установки АВК-35 и три УМП-21 располагались на расстоянии $\Gamma = 24$ ($l = 840$ м).

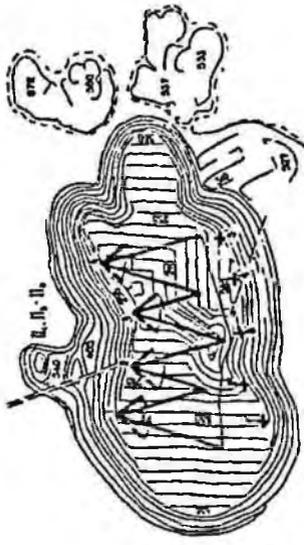
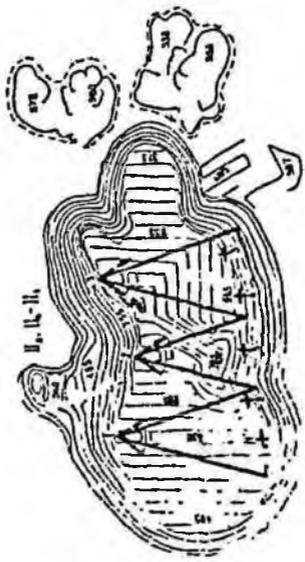
В каскадных продольных параллельно-вертных схемах I_3 и I_6 направление проветривания В—З, расстояние между двумя соседними вентиляторами $\Gamma = 100$, а в каскаде $\Gamma = 200$ ($l_1 \approx 1200$ м). На восточном борту карьера импаторы вентиляторов НК-12КВ располагались на отметке ∇ 315 м, а на западном — ∇ 330 м. Скорость углового перемещения варьировалась в диапазоне $\omega_M = 0 \div 6$ рад/с. Причем $\omega_M = 0$ соответствует статической схеме.

Установлено, что в поперечных параллельно-вертных схемах I $\omega_M = 4$ рад/с. С учетом этого определялась эффективность комбинированных схем I_2 и I_4 с применением установок УМП-21 (АВК-35). По сравнению со схемой $I_{\text{борт}}$ комбинированные схемы I_2 (с четырьмя УМП-21) и I_4 (двумя АВК-35) эффективнее на 15 %.

В продольных каскадных схемах I_5 (три НК-12КВ) $\omega_{\text{Монт}} = 5$ рад/с, а с четырьмя НК-12КВ (схема I_6) $\omega_{\text{Монт}} = 4,5$ рад/с.

При примерно одинаковой эффективности схем I_2 и $I_{\text{борт}}$ предпочтение следует отдать первой схеме по следующим причинам: 1) по величине капитальных и эксплуатационных затрат (комплекс I_2 — три НК-12КВ + три УМП-21; комплекс вентиляционный по схеме I_6 — четыре НК-12КВ); 2) возможность усреднения концентрации примесей за счет работы УМП-21 в режиме местного проветривания — более полное использование аккумуляющей способности атмосферы карьера; 3) по технологичности — установки располагаются на бермах уступов, а не в рабочей зоне технологического оборудования.

Этап II отработки карьера. На этом этапе отработки глубина карьера по замкнутому контуру 360 м. Аналогично этапу I последовала эффективность поперечных параллельно-вертных и комбинированных схем, а также продольных каскадных параллельно-вертных (рис. 4.7). Для схем II с (четыре НК-12КВ) $\Gamma = 80$. Импаторы располагались на северном борту ∇ (255+330) м. Для схем II_2 с тремя НК-12КВ $\Gamma = 120$. Скорость углового перемещения струй $\omega_M = 0 \div 6$ рад/с. В комбинированных схемах II_1 — II_2 импаторы установок, создающих вертикальные струи, УМП-



ПУБЛИС ДУМУА	$K_{\text{в}}$	СОСТАВ КОМБИНА
II, I	0,307	4111-12(1-4) 501117-210-5
II, I	0,227	4111-12(1-4) 1311-35(3)
II, I	0,273	4111-12(1-4) 21311-35(3-4)
II, I	0,238	3111-12(1-3) 501117-210(5)
II, I	0,220	3111-12(1-3) 1311-35(3)
II, I	0,238	3111-12(1-3) 21311-35(3-4)

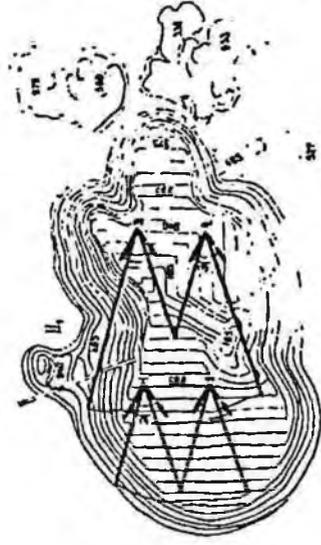
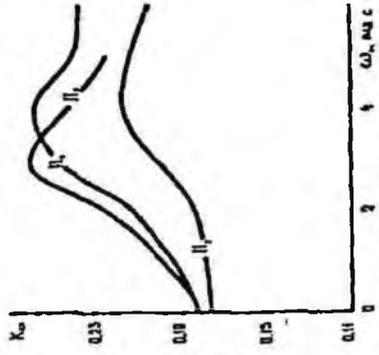


Рис. 4.7. Эффективность схем вентиляции на этапе II отработки карьера

21 (АВК-35) размещались на отметках ∇ (285+330) м южного борта карьера на расстоянии $\bar{\Gamma} = 20$ ($\bar{\Gamma} = 24$). В каскадных продольных параллельно-веерных схемах Π_0 направление проветривания В—З, установки 1, 2 размещены на западном борту (∇ 285 м), а 3, 4 — на восточном борту (∇ 240 м). Расстояние между соседними вентиляторами $\bar{\Gamma} = 100$, а $\bar{\Gamma}_K = 230$ ($\bar{\Gamma}_H = 1300$ м). Скорость углового перемещения струй в горизонтальной плоскости изменялась в диапазоне $\omega_M = 0 \div 6$ рад/с.

На втором этапе обработки для параллельно-веерных схем как из четырех НК-12КВ (Π_1), так и из трех НК-12КВ (Π_2) $\omega_{\text{Мотт}} = 4$ рад/с, при этом Π_1 эффективнее Π_2 на 20 %. При $\omega_{\text{НК}} = 4$ рад/с в комбинированных схемах Π_3 и Π_5 эффективность процессов проветривания повышается на 15—20 % по сравнению со схемой $\Pi_{2\text{опт}}$. Применение установок УМП-21 (АВК-35) совместно с тремя НК-12КВ позволяет повысить эффективность комбинированных схем Π_6 и Π_8 на 10 % по сравнению со схемой $\Pi_{2\text{опт}}$. Эффективность комбинированных схем Π_3 и Π_5 , включающих комплекс из четырех НК-12КВ и пяти УМП-21 (четыре НК-12КВ + два АВК-35), на 25—30 % выше, по сравнению со схемами Π_6 и Π_8 .

В каскадных схемах Π_0 максимальная эффективность обеспечивается при $\omega_M = 3$ рад/с, однако, по сравнению со схемой Π_3 , схема Π_0 имеет $K_{\text{ср}}$ меньший на 20 %.

Этап III обработки карьера. Имитаторы вентиляторов НК-12КВ располагались на отметке ∇ 165 м северного борта, а УМП-21 и АВК-35 на отметке ∇ 225 м южного борта карьера (рис. 4.8). Выбор вентиляционной бермы для НК-12КВ произведен с учетом взаимодействия струй при максимальной горизонтальной их дальности — $\bar{D}_{\text{max}} = 230$ (1300 м), а для вентиляторов на базе вертолетных винтов — с учетом вертикальной дальности и обеспечения условий подтекания воздуха к струям винтов $\bar{L} > 10$.

При исследовании поперечных параллельных статических схем III, с использованием четырех НК-12КВ путем вариации $\bar{\Gamma} = 60 \div 100$ определено $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} = 85$. Существование оптимальных значений параметра $\bar{\Gamma}$ в статических схемах проветривания можно объяснить следующими обстоятельствами. При $\bar{\Gamma} < \bar{\Gamma}_{\text{опт}}$ вентиляционный комплекс концентрируется в ограниченном пространстве, вследствие чего энергия струй используется недостаточно эффективно — в центральной части дальность взаимодействующих струй превышает необходимую, а на флан-

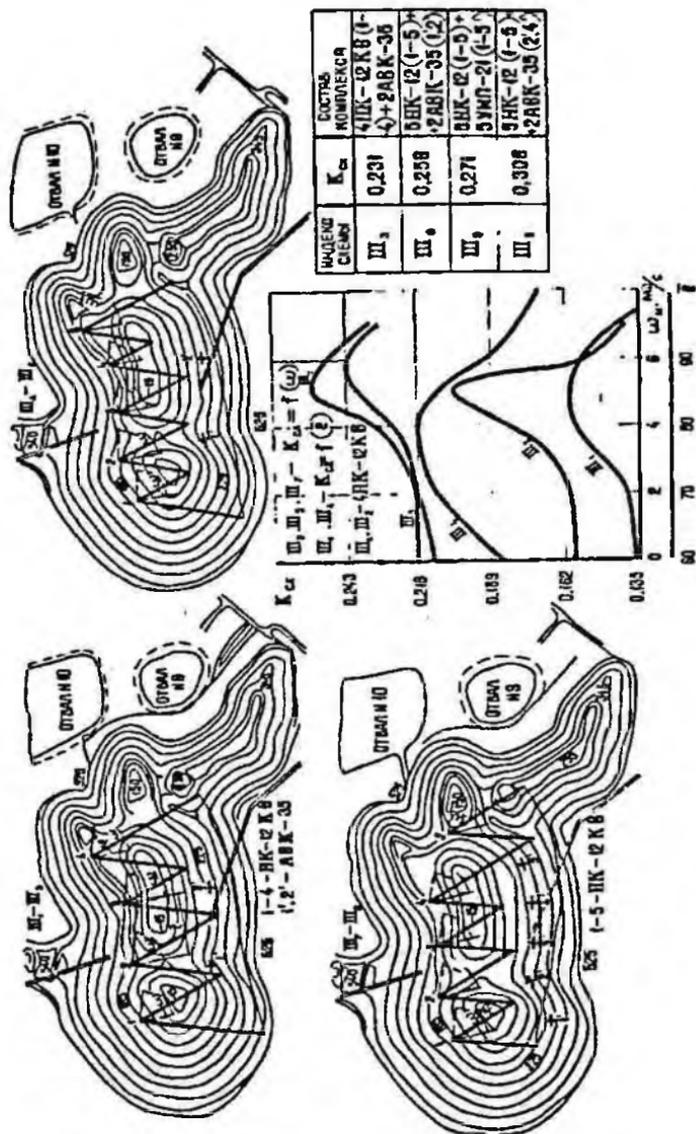


Рис. 4.8. Эффективность схем вентиляции на этапе III отработки карьера

гах — в западной и восточной частях образуются застойные зоны. При $\bar{\Gamma} > \bar{\Gamma}_{\text{опт}}$ взаимодействие струй оказывается недостаточным (или исчезает) для обеспечения необходимой дальнобойности, что приводит к снижению эффективности процессов проветривания. Таким образом, $\bar{\Gamma}_{\text{опт}}$ соответствует равномерному распределению струй в атмосфере карьера.

В “динамических” параллельно-веерных схемах Ш_2 оптимальная скорость углового перемещения струй имитаторов НК-12КВ определялась путем изменения ее в диапазоне $\omega_M = 3 \div 7$ рад/с при $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} < 85$, установленном по величине $K_{\text{сх}}$ для статических схем Ш_1 . Существование оптимальных значений ω обусловлено следующими причинами. При $\omega < \omega_{\text{опт}}$ не обеспечивается достаточной турбулизации воздуха в атмосфере карьера — низкий коэффициент “перемежаемости”. При $\omega > \omega_{\text{опт}}$ происходит искривление траекторий осей струй и снижение дальнобойности, что приводит к снижению эффективности процессов проветривания. Для схем Ш_2 $\omega_{\text{опт}} = 5$ рад/с, что соответствует скорости в натуре $\omega_n = \omega_M/m_\omega = \omega_M/200 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ рад/с.

Для комбинированных схем Ш_3 с использованием четырех НК-12КВ и двух АВК-35 применение последних позволяет повысить эффективность процессов проветривания на 15 % по сравнению с оптимальной схемой Ш_2 с параметрами $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} = 85$ и $\omega_{\text{Мопт}} = 5$ рад/с.

Для вентиляционного комплекса из пяти НК-12КВ, работающих по статической схеме Ш_4 , $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} = 80$ (см. рис. 4.8).

Из параллельно-веерных схем Ш_5 наиболее эффективной является схема с параметрами $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} = 80$, $\omega_{\text{опт}} = 6,0$ рад/с.

Применение в комбинированных схемах Ш_6 двух АВК-35 обеспечивает повышение эффективности на 20 % по сравнению с оптимальной схемой $\text{Ш}_{3\text{опт}}$.

В связи с наличием большой выработки в юго-восточной части карьера была проверена возможность увеличения эффективности процессов проветривания за счет перемещения пятой установки НК-12КВ к большой оси карьера 1—1 (схемы Ш_7). По величине $K_{\text{сх}}$ установлено, что при $\omega_{\text{опт}} = 5$ рад/с и $\bar{\Gamma}_{\text{опт}} = 80$ эффективность повышается на 20 % по сравнению с оптимальной схемой Ш_3 . При таком расположении установок эффективность комбинированных схем с использованием УМП-21 и АВК-35 увеличивается, соответственно, на 10 % (схема Ш_8) и 20 % (схема Ш_9). По графикам рис. 4.9 снижения концентрации $\bar{C}_K = f(\tau_n)$ можно определить параметры работы системы

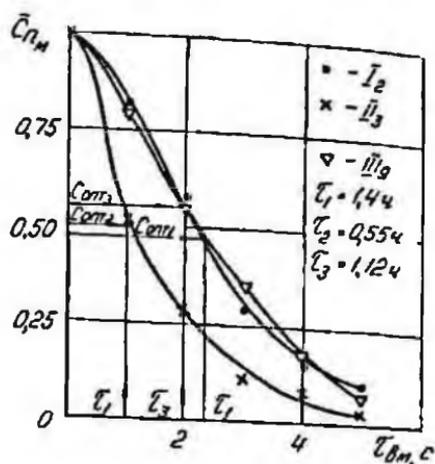
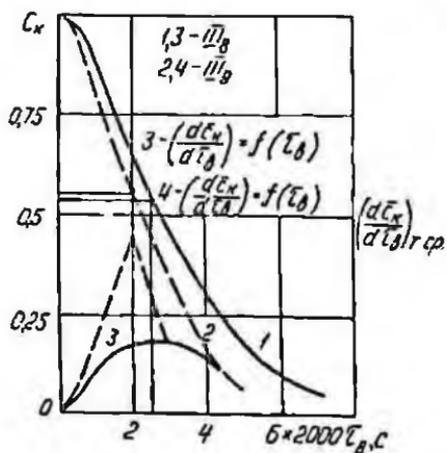


Рис. 4.9. К определению параметров цикла вентиляции на этапе III отработки

Рис. 4.10. Параметры циклов на трех этапах отработки

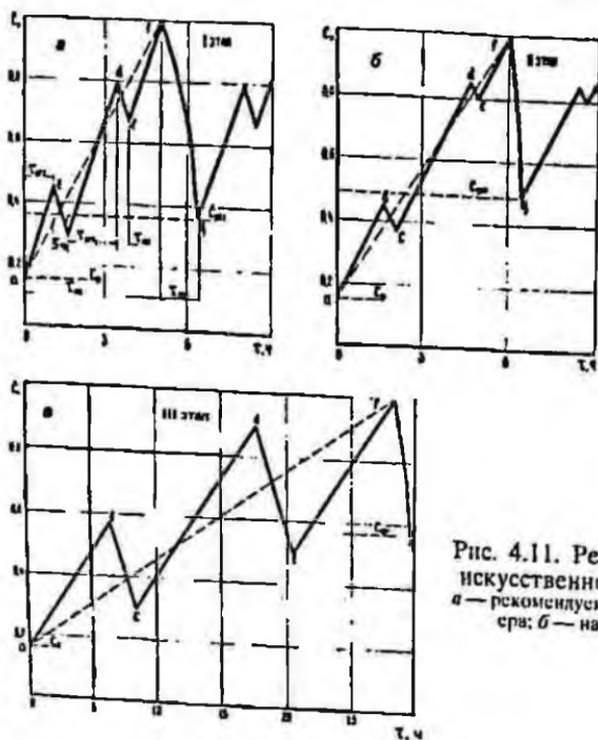


Рис. 4.11. Режимы работы системы искусственной вентиляции карьера: а — рекомендуемый на этапе I отработки карьера; б — на этапе II; в — на этапе III

в режиме общеобменного проветривания. Для схемы III_г (пять НК-12КВ + пять УМП-21) $\tau_{\text{общ}} = 2,4$ ч, а $C_{\text{копт}} = 0,53$; для комплекса из пяти НК-12КВ и двух АВК-35 (схема III_д) $\tau_{\text{общ}} = 2,12$ ч, а $C_{\text{копт}} = 0,55$.

Из анализа результатов лабораторных экспериментов по определению эффективности схем искусственной вентиляции карьера "Мурунтау" следует, что на первом этапе отработки (глубина карьера 275 м) наиболее эффективными являются комбинированные схемы, реализуемые с помощью трех вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М и трех УМП-21 (одного АВК-35), на втором этапе — четырех НК-12КВ-1М и пяти УМП-21 (двух АВК-35), на третьем этапе — пяти вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М и пяти УМП-21 (двух АВК-35).

При отработке карьера этапах II и III целесообразно реализовать предложение о создании электровентиляторов на базе винтов вертолетов Ми-6 и Ми-26.

Для схем искусственной вентиляции, обеспечивающих максимальную скорость снижения концентрации (рис. 4.10) производится выбор рациональных режимов работы средств проветривания на трех этапах отработки карьера (рис. 4.11). Линии *af* характеризуют процесс накопления вредных примесей в атмосфере всего карьера. Параллельные линии *bc* и *de* характеризуют процесс снижения концентрации вредных примесей при работе установок УМП-21 (АВК-35) в режиме местного проветривания. Параллельные линии *ab*, *cd* и *ef* характеризуют процесс накопления вредных примесей в рабочей зоне карьера ($V_{\text{ра}} = (0,5—0,7) V_k$). Линии *fg* характеризуют режим работы всего вентиляционного комплекса.

Методика обработки экспериментальных данных

Обработка полученных данных в результате исследований физического моделирования процессов искусственной вентиляции производится с помощью ЭВМ (рис. 4.12).

Для выбранного способа регистрации вредных примесей в модели карьера величина $k'C$, пропорциональная концентрации дыма в данный момент в выбранной точке карьерного пространства, может быть найдена из выражения [189]:

$$k'C_i = \ln \left(\frac{h_{\text{max}}}{h} \right), \quad (4.25)$$

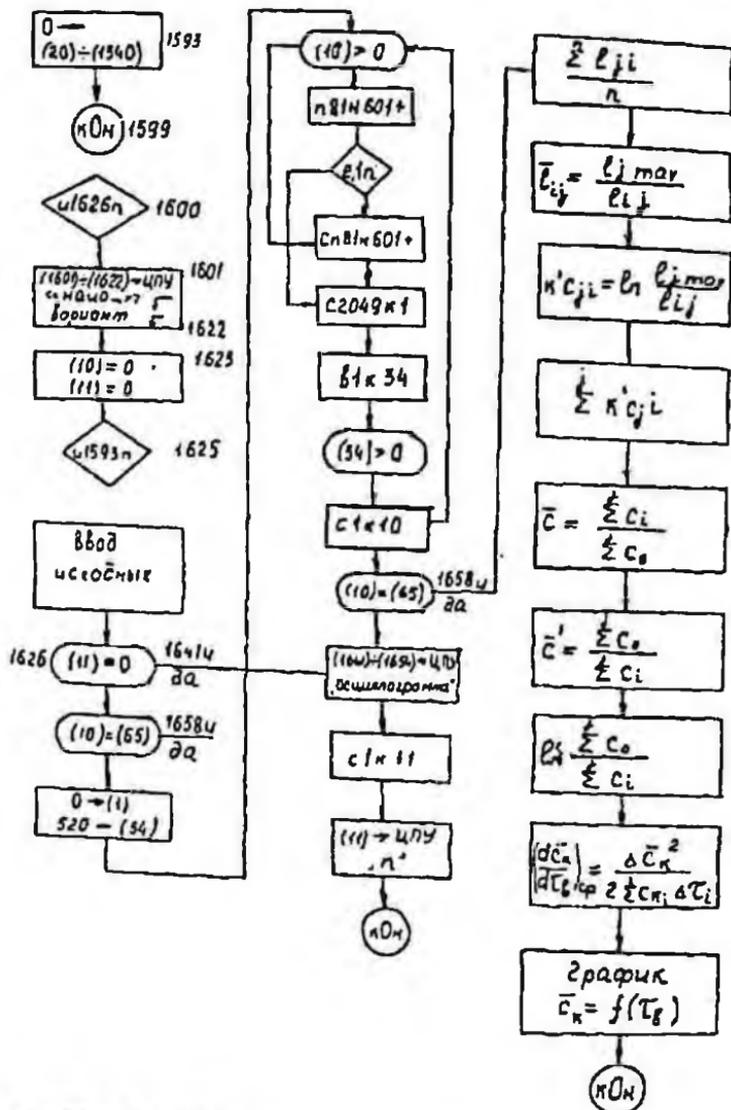


Рис. 4.12. Алгоритм программы обработки результатов физического моделирования процессов проветривания на ЭВМ

где h_{max} — средняя скорость дыма на пути от источника до центра дыма в модели, равной нулю

h — то же самое, но в заданной точке;

k' — постоянная датчика.

Оценка метода исследования и оценка достоверности экспериментальных данных сводится к определению точности регистрации дыма в модели карьера по величине коэффициента регистрации w и надежности доверительного интервала Δ . В связи с тем, что концентрация дыма в модели карьера измеряется косвенным путем, зависимость средней концентрации, определяемая по средним значениям измерений всех датчиков, имеет вид:

$$Y = x_1/x_2 \quad (4.26)$$

где $x_1 = \sum_{i=1}^n k' C_i$ — сумма средних концентраций;

$x_2 = n_1$ — число датчиков;

$Y = \overline{k'C}$ — средняя концентрация дыма в модели.

Выражение (4.25) можно записать в виде:

$$\overline{k'C} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^n k' C_i. \quad (4.27)$$

В данном случае правило сложения дисперсий можно записать

$$\sigma_y^2 = \frac{\sigma_{x_1}^2}{x_2^2} + \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2. \quad (4.28)$$

Так как средняя квадратическая ошибка постоянной величины равна нулю, $n_1 = \cos \alpha$, $\sigma_{x_2} = S_{m_1} = 0$, то выражение (4.28) принимает вид

$$S_{nk'C}^2 = \frac{S_n^2 \sum k'C_i}{n_1^2} + \left(\frac{\sum k'C_i}{n_1^2} \right) S_{m_1}^2 = \frac{S_n^2 \sum k'C_i}{n_1^2}, \quad (4.29)$$

откуда находим величину средней квадратической ошибки принятой методики измерения концентрации дыма в модели карьера.

$$S_{n\bar{C}} = \frac{1}{n_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} S_{n\Sigma k' C_i}^2}. \quad (4.30)$$

Коэффициент вариации определяем, произведя замену $\sigma_y = S_{n\bar{C}}$ и $k'C$ на \bar{x} :

$$w = 100 \frac{\sigma_y}{\bar{x}} = 100 \frac{S_{n\bar{C}}}{k'C}. \quad (4.31)$$

Точность измерения амплитуд в соответствующих временных интервалах осциллограм

$$\Delta h = \pm 5 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \quad (4.32)$$

Так как величина амплитуды h_i зависит от чувствительности гальванометра, а определение количества вредных примесей в модели карьера производится по осредненным данным всех датчиков, то для оценки способа обработки экспериментальных данных находим среднюю относительную ошибку линейных измерений. Оценку производим по средним значениям h_{0i} , соответствующим нулевому интервалу.

$$\delta = 100 \Delta h / \bar{h}_{0i}, \quad (4.33)$$

где \bar{h}_{0i} — среднее значение величины амплитуд всех датчиков.

Принимая величину интервала $\Delta x = \delta/4$, значение коэффициента Стьюдента определяется по формуле

$$\tau_{\text{ан}} = \frac{\delta \sqrt{n_2}}{4 S_{n\bar{C}}}, \quad (4.34)$$

где n_2 — общее число измерений концентрации дыма в модели.

По полученным значениям $\tau_{\text{ан}}$ из таблиц [190] находим необходимое количество экспериментов n при заданном коэффициенте доверительной вероятности. Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что для получения доверительной вероятности 0,95—0,98 достаточно продувку каждой схемы производить 3 раза при числе датчиков $n_1 = 20$.

4.2. Результаты промышленных экспериментов по общеобменной вентиляции карьера

Первые эксперименты по применению систем некустарной вентиляции на базе авиационных ТВД для общеобменной проветривания были проведены на Центральном карьере Горобинского рудоуправления (ГБРУ) ЦГМК в 1971—1973 гг. [92, 93]. Объем карьера составлял $90 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

При проведении экспериментов загрязнение атмосферы карьера имитировалось дымовыми шапками типа ВДМ-15. Концентрация вредных примесей определялась как с помощью экспрессного метода прибором ПЗВ-3, так и путем химического анализа проб воздуха (табл. 4.2 и 4.3).

В результате экспериментов установлено, что за 30 минут активного проветривания одним НК-12КВ концентрация вредных примесей снизилась в 12—15 раз и достигла санитарного уровня [92].

В феврале 1973 г. на том же карьере был проведен эксперимент по общеобменной вентиляции карьера с помощью двух АИ-20КВ и одного НК-12КВ (рис. 4.13) в условиях температурной инверсии $\gamma \approx -0,02 \text{ К/м}$. Результаты метеонаблюдений в атмосфере карьера перед проведением экспериментов приведены в табл. 4.4.

По данным визуальных наблюдений сотрудников Уральского управления гидрометеослужбы (на отметке +208 м), процесс проветривания протекал следующим образом. До выведения всех вентиляторов на рабочий режим (0,85 номинала) заметной деформации дымового облака в карьере не происходило, несмотря на наличие слабого ветра на поверхности $U_0 = 1 \div 1,5 \text{ м/с}$ (отметка +350 м, точка № 1). После вывода на рабочий режим дым начал выходить через северный борт карьера. Через 15 минут газ на дне интенсивно рассеивался, а через 40 минут атмосфера всего карьера была очищена от дыма, что подтверждено результатами химического анализа проб воздуха в лаборатории ВГСЧ.

В процессе проветривания струи карьерных вентиляторов АИ-20КВ перемещались в горизонтальной плоскости при фиксированных углах наклона $\beta_n = -\pi/2 \text{ рад}$ (-15°) и $\beta_n = \pi/2 \text{ рад}$. Струя вентилятора НК-12КВ перемещалась как в горизонтальной $\varphi = \pi/2 \text{ рад}$, так и в вертикальной $\beta_n = \pm\pi/2$ плоскостях.

По окончании процесса проветривания инверсия в атмосфере карьера была разрушена, температура на нижних горизонтах карьера сместилась в область положительных значений и по аб-

Таблица 4.2

Изменение концентрации аэрозоля в атмосфере карьера ГБРУ при искусственном проветривании

№ пробы	Время отбора	Продолжительность отбора проб, с	Концентрация аэрозоля, мг/м ³	Примечание
1	16 ч 20 мин	300	1,7	Подожжено 10 шашек
2	16 ч 35 мин	20	30	
3	16 ч 40 мин	20	30	
4	16 ч 45 мин	10	30	Вентилятор включен
5	16 ч 55 мин	30	30	
6	17 ч 05 мин	60	14	Вентилятор выключен
7	17 ч 15 мин	180	2,3	

Таблица 4.3

Изменение концентрации окислов азота в атмосфере карьера ГБРУ

№ пробы	Время отбора пробы	Концентрация, %	Примечание
1	16 ч 30 мин	0,00010	Пробы 1—4 отобраны при задымлении карьера
2	16 ч 35 мин	0,00040	
3	16 ч 40 мин	0,0010	
4	16 ч 45 мин	0,00140	
5	16 ч 50 мин	0,00050	Пробы 5—7 отобраны в процессе проветривания карьера одной установкой НК-12КВ
6	17 ч 00 мин	0,00030	
7	17 ч 10 мин	0,00010	

солютной величине даже выше, чем на верхних горизонтах за счет внесения избыточного тепла струй вентиляторов. Данные метеоусловий в конце эксперимента приведены в таблице 4.5.

В результате воздействия турбулентных струй температурный градиент в атмосфере карьера изменился от $\gamma_n = -0,02$ К/м до $\gamma = 0,005$ К/м.

В 1978—1980 гг. были проведены промышленные эксперименты по общеобменной вентиляции карьера Целинного горнохимического комбината (ЦГХК). Система искусственной вентиляции карьера (рис. 4.14) состоит из двух карьерных вентиляторов-оросителей НК-12КВ. В октябре 1978 г. запуски системы производились с целью предотвращения загрязнения атмосферы карьера выхлопными газами автотранспорта. В результате ис-

Рис. 4.13. Схема расположения вентиляторов при общеобменном проветривании карьера ГБРУ

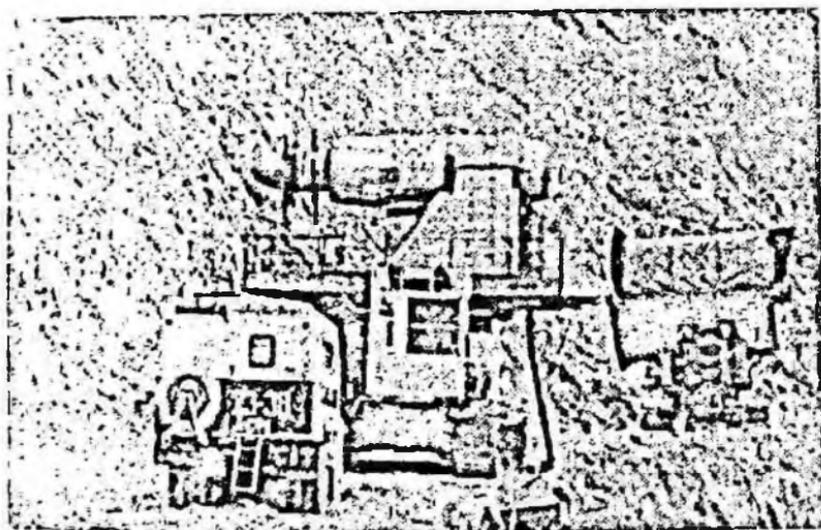


Рис. 4.14. Система искусственной вентиляции карьера ЦГХК

Таблица 4.4

Метеоусловия в карьере перед экспериментом

№ точки и место наблюдения	Время наблюдения	Направление ветра	Скорость ветра, м/с	Температура, К
№ 2, отметка +208 м, пост № 23	15 ч 00 мин	СЗ	0,4	274,0
	15 ч 30 мин	—	0	274,1
	15 ч 50 мин	СЗ	0,5	274,1
	16 ч 25 мин	—	0	274,0
№ 3, отметка +413 м, (установка)	14 ч 30 мин	—	0	273,5
	15 ч 00 мин	—	0	271,4
№ 4, отметка +59 м, дно карьера	14 ч 30 мин	СЗ	0,5	271,4
	15 ч 00 мин	СЗ	0,7	271,4

Таблица 4.5

Метеоусловия в атмосфере карьера после эксперимента

№ точки и место наблюдения	Время наблюдения	Направление ветра	Скорость ветра, м/с	Температура, К
№ 2, отметка +208 м, пост № 23	17 ч 30 мин	СЗ	1,1	274,9
	17 ч 50 мин	СЗ	0,5	274,8
№ 3 отметка +143 м, (установка)	17 ч 55 мин	—	2,3	274,9
	18 ч 00 мин	—	0	275,6
№ 4 отметка +59 м, дно карьера	18 ч 00 мин	—	0	275,6

пытаний было установлено, что в течение одного часа работы двух вентиляторов обеспечивается снижение концентрации окислов азота в 4 раза (от ПДК до 0,25 ПДК). Анализ проб воздуха производился в лаборатории ВГСЧ.

В феврале 1980 г. проводились эксперименты по разрушению температурной инверсии, способствующей загрязнению атмосферы карьера, а также по проветриванию карьера, загрязнения которого имитировалось дымовыми шашками. Температурная инверсия в атмосфере карьера при $\gamma_{\text{и}} = -0,022$ К/м была разрушена за 35 минут струями двух вентиляторов НК-12КВ, работающих на режиме 0,7 номинала. После проветривания в атмосфере карьера установилась изотермическая стратификация (рис. 4.15). Параметры атмосферы карьера определялись с помощью привязного радиозонда, сигналы от которого записывались на ленте ондулятора, а затем расшифровывались (рис. 4.16).

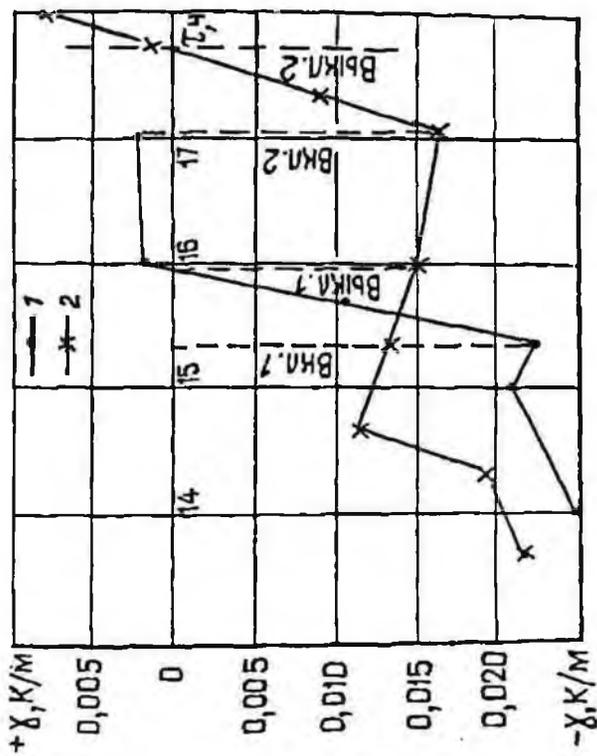
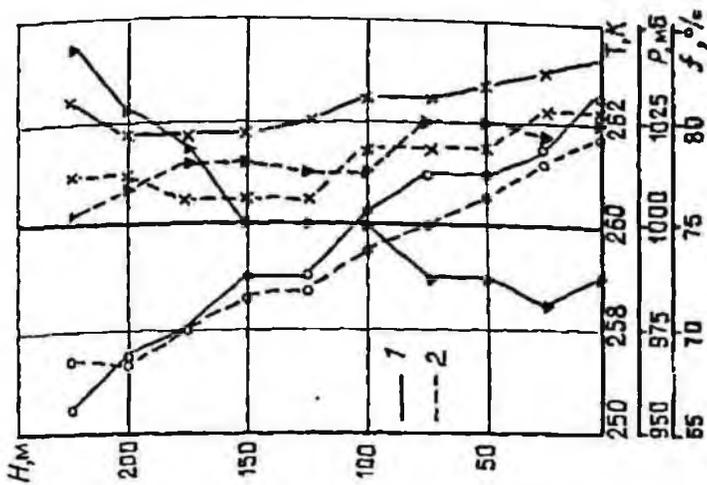


Рис. 4.15. Результаты экспериментов по общему проветриванию карьера в условиях температурной инверсии: 1 и 2 — соответственно, первый и второй эксперименты

Рис. 4.16. Измененные параметры атмосферы карьера в результате работы систем вентиляции: 1 и 2 — до и после эксперимента

11 февраля 1980 г. перед проведением эксперимента в атмосфере карьера была инверсия с $\gamma = -0,0165$ К/м. Имитация загрязнения карьера производилась с помощью дымовых шашек ПДШ-15 (4 шт.), привязанных к наклонной платформе вентилятора, оборудованного кожухом (НК-12КВ-1М). Задымление карьера осуществлялось при работе двигателя вентилятора на режимах малый газ (0,4 номинала). После задымления двигателями обоих вентиляторов работали 0,5 часа на режиме 0,85 номинала. Перемещение струй внутри карьерного пространства в процессе проветривания производилось по динамической схеме параллельный веер. По окончании работы вентиляторов в атмосфере карьера установился температурный градиент $\gamma = 0,002$ К/м, а затем $\gamma = 0,008$ К/м.

В июле 1980 г. был проведен эксперимент по общеобменному проветриванию карьера в условиях штiria. Загрязнение атмосферы карьера имитировалось дымовыми шашками БДШ-15, которые располагались на дне карьера (отметка +40 м). Параметры атмосферы карьера — температура, давление и относительная влажность — определяли с помощью привязного радиозонда А-22. До проведения эксперимента в атмосфере карьера температурный градиент был $\gamma_{\text{н}} = -0,008$ К/м. После прекращения горения шашек в струю одного вентилятора была подана вода. В результате взаимодействия воды с дымом в атмосфере карьера образовался смог, который перемешивался струями двух вентиляторов, работающих на режимах 0,4—0,85 номинала. После прекращения подачи воды карьер проветривался двумя установками в течение 25 минут. Изменение параметров атмосферы карьеров приведено на рис. 4.17. В результате эксперимента в атмосфере карьера установилась изотермия, при этом температура воздуха увеличилась на 2 К, а относительная влажность на 5—7 %.

Анализ результатов промышленных экспериментов на одном из карьеров Средней Азии ("Мурунтау") показал, что проветривание карьера можно осуществить двумя вентиляторами НК-12КВ за 1,5 часа при $\gamma_{\text{н}} = -0,01$ К/м, в то время как при аналогичных метеоусловиях, но без применения средств проветривания, происходит загрязнение атмосферы карьера за 4 часа работы.

Сопоставление результатов лабораторных и промышленных экспериментов по искусственной вентиляции карьера Целинного ГКХ, приведенных на рис. 4.18 выполнено на основании методов, изложенных в работах [190, 201].

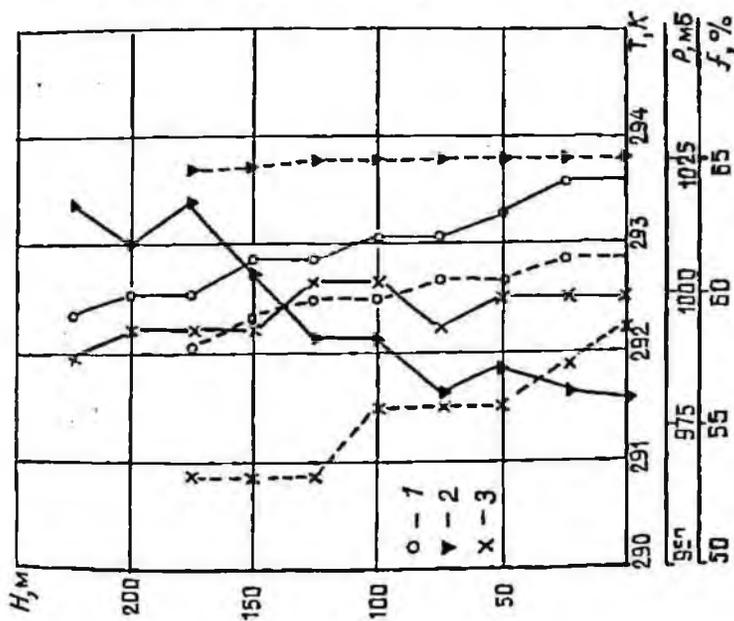


Рис. 4.17. Изменение параметров атмосферы карьера при проведении электриветания
1 — дутье; 2 — температура; 3 — отн. влажность.

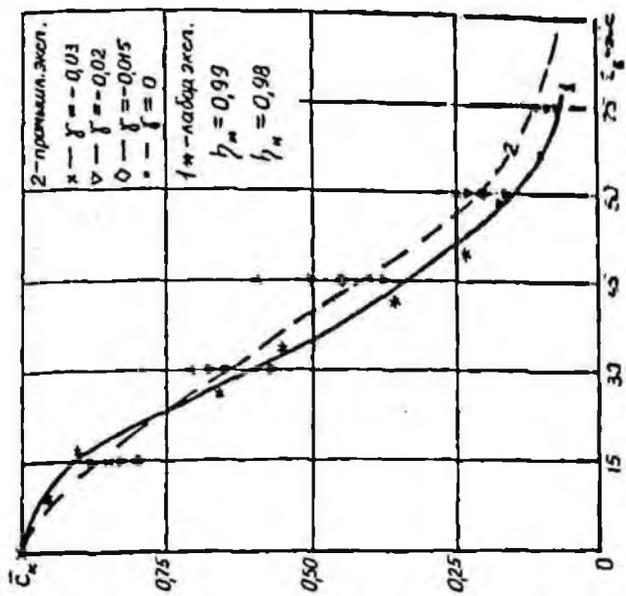


Рис. 4.18. Сопоставление результатов лабораторных и промышленных электриветаний по относительной влажности
1 — лаборатория; 2 — отн. влажность.

Для исключения грубых ошибок измерений нужна проверка однородности наблюдений с помощью τ — распределения

$$\tau = \frac{(\bar{C}_k^* - \bar{C}_k)}{S} > \tau_{1-p}, \quad (4.35)$$

где \bar{C}_k^* — сомнительный элемент выборки;
 \bar{C}_k — среднее значение исследуемой выборки;
 S — среднеквадратическое отклонение (стандарт) выборки.
 Величины \bar{C}_k^* и \bar{C}_k рассчитывают по формулам

$$\bar{C}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{C}_{k_i}, \quad (4.36)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{k_i} - \bar{C}_k)^2}, \quad (4.37)$$

где n — общее количество измерений;
 \bar{C}_{k_i} — значение концентрации в i -й момент времени.

Вследствие того, что для элемента $\bar{C}_k^* = 0,6$ при $\tau_u = 2700$ с
 $\tau = \frac{0,6 - 0,4673}{0,0468} = 2,836 > \tau_{1-p} = 2,065$ при уровне значимости $p = 0,05$, это значение следует исключить из обработки. Таким образом, общее число измерений в промышленных экспериментах составляет $n = 34$.

Необходимое количество промышленных экспериментов определяется по формуле

$$n \geq \tau_{1-p}^2 \frac{S^2}{\epsilon^2}, \quad (4.38)$$

где τ_{1-p} — коэффициент Стьюдента, при доверительной вероятности 0,9—0,95;

$$\tau_{1-p} = 1,645 \div 1,96;$$

ϵ — точность измерений;

S — среднеквадратическое отклонение.

По результатам измерений $S_{\max}^2 = 0,00322$ при $\tau_u = 2700$ с. Для химического анализа проб воздуха $\epsilon = 0,05 \div 0,10$.

Поскольку $\left(\frac{S}{\epsilon}\right)_{\max}^2 = 1,288$, $n = (2,706 \div 3,84) \cdot 1,288 = 4 + 5$. Та-

ким образом, выполненное количество экспериментов $n = 5$ является достаточным для обеспечения заданной точности получаемых результатов.

Необходимое количество продувок модели по одной схеме определено в работах [90, 189].

Оценка точности применяемых методик измерений производится путем сравнения дисперсий по критерию Кохрана

$$G = \frac{S_{i,\max}^2}{\sum_{i=1}^k S_i^2}, \quad (4.39)$$

где $S_{i,\max}^2$ — максимальное значение выборочной дисперсии в интервале.

Величины S_i^2 рассчитывают по формуле

$$S_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum (\bar{C}_k - \bar{\bar{C}}_k)^2, \quad (4.40)$$

где $\bar{\bar{C}}_k$ — среднее значение концентрации примесей в i -м интервале.

n_i — количество измерений в i -м интервале.

Для промышленных экспериментов

$$G = 0,00322/0,0114 = 2,824 < G_{1-p} = 0,4307$$

при доверительной вероятности 0,95. Следовательно, при уровне значимости $p = 0,05$ расхождение между дисперсиями можно считать незначительным.

Средневзвешенная дисперсия всех результатов измерений определяется из уравнения:

$$S^2 = \sum_{i=1}^k f_i S_i^2 / f, \quad (4.41)$$

где f_i — число степеней свободы в i -м интервале,

$$f_i = n_i - 1;$$

$$f — \text{общее число степеней свободы, } f = \sum_{i=1}^k f_i.$$

Для промышленных экспериментов $S^2 = 0,001566$, а выборочный стандарт $S = 0,0396$.

Уравнения приближенной регрессии отыскивают по принципу наименьших квадратов. Полагая, что они имеют вид $\bar{C}_k = e^{-a_1 \tau_n^2 + a_2 \tau_n + a_3}$, составляют системы нормальных уравнений для регрессии второго порядка после замены $Y = \ln \bar{C}_k$. Так как при $\tau_n = 0$ $\bar{C}_k = 1,0$, то $a_3 = 0$ и уравнения принимают такую форму:

$$\begin{cases} \sum Y_i - \sum (a_2 \tau_{ni} - a_1^2 \tau_{ni}^2) = 0 \\ \sum Y_i \tau_{ni} - \sum (a_2 \tau_{ni}^2 - a_1^2 \tau_{ni}^3) = 0 \\ \sum Y_i \tau_{ni}^2 - \sum (a_2 \tau_{ni}^3 - a_1^2 \tau_{ni}^4) = 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

В результате решения системы уравнений (4.42) с помощью ЭВМ получена зависимость для промышленных экспериментов

$$\bar{C}_{кн} = e^{-8,483 \cdot 10^{-4} \tau_n^2 - 1,13 \cdot 10^{-4} \tau_n}, \quad (4.43)$$

откуда $a_{1н} = 2,912 \cdot 10^{-4}$, $a_{2н} = -1,13 \cdot 10^{-4}$.

Аналогичное уравнение получено по результатам лабораторных экспериментов при искусственном проветривании модели карьера по идентичной схеме.

$$\bar{C}_{кн} = e^{-8,777 \cdot 10^{-4} \tau_n^2 - 2,125 \cdot 10^{-4} \tau_n}. \quad (4.44)$$

Из (4.44) $a_{1н} = 2,962 \cdot 10^{-4}$, $a_{2н} = -2,125 \cdot 10^{-4}$.

Степень точности уравнений (4.43), (4.44) определяется по критерию Фишера

$$F = \frac{D_2}{S^2} < F_{1-p}. \quad (4.45)$$

Значение дисперсии D_2 результатов измерений от линии регрессии рассчитывается по формуле

$$D_2 = \frac{1}{m-3} \sum_{i=1}^m (\bar{C}_{K_i} - \bar{C}_{Kp_i})^2, \quad (4.46)$$

где m — количество интервалов τ_n ;

\bar{C}_{Kp} , — значение безразмерной концентрации примесей по уравнениям (4.43) и (4.44).

Значения $m_n = 7$, $m_m = 10$. На основании расчетов по формуле (4.46) $D_{2n} = 2,94 \cdot 10^{-3}$, $D_{2m} = 4,18 \cdot 10^{-3}$. Величины $S_n^2 = 0,001566$, $S_m^2 = 0,00361$.

По формуле 4.45 $F_n = 1,88 < F_{0,95(6,7)} = F_m = 1,16 < F_{0,95(9,10)} = 1,95$, следовательно, уравнения приближенной регрессии не нуждаются в уточнении.

Корреляционное отношение может быть рассчитано по формуле

$$\eta = \sqrt{\frac{\delta^2}{\sigma_{\bar{C}_K}^2}}, \quad (4.47)$$

где $\sigma_{\bar{C}_K}^2 = D = \frac{\sum m_i \bar{C}_{Kcp_i}^2}{n} - \bar{C}_K^2$ — дисперсия результатов экспериментов

$$\delta^2 = \sigma_{\bar{C}_K}^2 - \bar{\sigma}_{\bar{C}_K}^2 = D - \bar{D};$$

$$\frac{\sum (\bar{C}_{Kcp_i} - \bar{C}_{Kp_i})^2}{n_1} = \bar{\sigma}_{\bar{C}_K}^2 = \bar{D} \text{ — дисперсия средних значений}$$

концентрации от линии регрессии;

n_1 — количество интервалов τ .

Значение \bar{C}_K определяется по формуле

$$\bar{C}_K = \frac{\sum m_i \cdot \bar{C}_{Kcp_i}}{n}. \quad (4.48)$$

В результате расчетов определены следующие значения для промышленных экспериментов: $\bar{C}_K = 0,646485$; $D = 0,1195$; $\bar{D} = 4,192 \cdot 10^{-4}$; $\delta^2 = 0,119$.

Корреляционное отношение $\eta_n = 0,98$.

Для лабораторных экспериментов значения составляют:

$\bar{C}_K = 0,495$; $D = 0,114065$; $\bar{D} = 4,185 \cdot 10^{-4}$; $\delta^2 = 0,1136465$; $\eta_m = 0,99$

Значимость корреляционного отношения может быть проверена по F -критерию.

$$F = \frac{\eta^2}{1 - \eta^2} \cdot \frac{(n - n_1)}{(n_1 - 1)} > F_{1-p} \quad (4.49)$$

$$F_{\eta} = \frac{0,9781}{0,022} \cdot \frac{27}{6} = 200 > F_{0,95(6,27)} = 2,45,$$

$$F_{\eta} = \frac{0,996}{0,00367} \cdot \frac{20}{9} = 601 > F_{0,95(9,20)} = 3,5.$$

Следовательно, зависимости (4.43) и (4.44) являются надежными при уровне значимости $p = 0,05$.

Степень соответствия результатов лабораторных и промышленных экспериментов определяется по отношению времени проветривания карьера к его модели при одинаковых уровнях концентрации $\bar{C}_{\text{кн}} = \bar{C}_{\text{км}}$. Расчетная формула выводится из уравнений регрессии (4.43) и (4.44).

$$\theta = \sum_{i=1}^n Q_i / n, \quad (4.50)$$

где $Q_i = \tau_{\text{км}} / \tau_{\text{кн}}$; n — количество уровней.

При $n = 20$ $\theta = 0,85$, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости результатов лабораторных и промышленных экспериментов. Необходимо отметить, что при наличии подземных выработок для интенсификации процессов разрушения температурных инверсий может быть использован способ, предложенный в работах [51, 187, 202]. Сущность его заключается в использовании тепла горных пород.

4.3. Перспективы искусственной вентиляции карьеров вертикальными струями*

В течение ряда лет на различных карьерах проводились эксперименты по организации искусственного воздухообмена загрязненных зон с помощью вентиляционных струй, создаваемых специальными вентиляторами на базе вертолетных винтов [203]. НИПИгормаш и ИГД МЧМ СССР были разработаны

*Написано д. т. н. Коноревым М. М. совместно с инженером Блонским М. В.

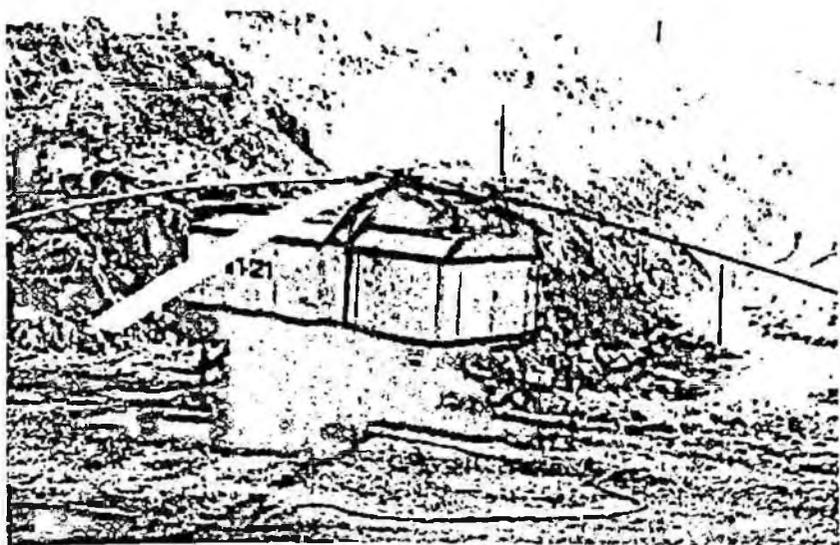


Рис. 4.19. Вентилятор ВУ-21 в Карагайском карьере

опытные образцы вентиляторов ВУ-14 и ВУ-21, оснащенные вертолетными винтами диаметром 14,3 и 21 м (рис. 4.19). Установки создают вертикальные и наклонные восходящие вентиляционные струи, выносящие загрязненный воздух с нижних горизонтов карьера (табл. 4.6, 4.7). Они предназначены для предотвращения и ликвидации локальных и общих загрязнений атмосферы карьера в периоды нарушения естественного воздухообмена [264].

Известно, что случаи опасного загрязнения атмосферы карьеров чаще всего наблюдаются в периоды устойчивого состояния атмосферы с температурной инверсией, когда температура воздуха с высотой увеличивается, а температурный градиент в атмосфере принимает отрицательные значения. При этом холодный и более плотный воздух заполняет нижнюю часть карьера, в атмосфере прекращается практически всякая вертикальная конвекция и вынос вредных примесей из карьера. В эти периоды чаще всего возникает необходимость в искусственном проветривании.

Испытания и опытно-промышленная эксплуатация вентиляторов проводились на карьерах Кольского полуострова: Оленегорском, Ковдорском, на Саамском карьере ПО "Апатит", Центральном карьере комбината "Ураласбест" и Карагайском карьере

Таблица 4.6

Основные технические характеристики вентиляторов

Показатель	ВУ-14	ВУ-21
Начальная производительность, м ³ /с	1120	2520
Высота подъема струи, м	150—240	200—300
Угол поворота струи, град		
в вертикальной плоскости	±30	±45
в горизонтальной плоскости	±360	±360
Мощность приводного электродвигателя, кВт	315	1000
Масса, кг	27500	3500

Таблица 4.7

**Высота подъема вертикальной струи вентиляторов ВУ-14 и ВУ-21
в зависимости от величины температурного градиента**

Тип вентилятора	Температурный градиент, К/100 м					
	0	-1	-2	-3	-4	-5
	Высота подъема, м					
ВУ-14	238	200	180	168	159	152
ВУ-21	310	260	235	219	207	198

ере комбината "Магнезит". Целью этих испытаний являлась проверка результатов теоретических и экспериментальных исследований, положенных в основу идеи струйной вентиляции карьеров, эффективности вентиляторов по осуществлению воздухообмена в застойных зонах, соответствия их реальных технических характеристик расчетным, проверка надежности и целесообразности конструкции установок и определение путей их совершенствования. Наибольшая эффективность проветривания была достигнута в Саамском карьере, имеющем размеры в плане 850×630 м и глубину 180 м. До применения вентиляции карьер подвергался систематическому загрязнению выхлопными газами автотранспорта до концентраций СО и N₂O₅ в атмосфере, в несколько раз превышающих ПДК, чему способствовали горно-технические и метеорологические условия. Эти обстоятельства часто приводили к необходимости приостановки горных работ на несколько часов в ожидании естественного проветривания карьеров. Поэтому в 1978 г. было принято решение о создании системы искусственной вентиляции с помощью установок местного проветривания УМП-14 (прототип ВУ-14), разработанный

институтом НИПИгормаш на основе научно-исследовательских работ лаборатории проветривания карьеров ИГД МЧМ СССР.

Установка УМП-14 располагалась на нижних горизонтах карьера и осуществляла проветривание вертикальной и наклонной (до 30°) струей. Эффективность вентиляции оценивалась по времени снижения концентрации вредных газов и визуально по степени прозрачности атмосферы в карьере. Было отмечено, что в условиях штиля или слабого ветра на поверхности при работе вентилятора концентрация вредных газов в атмосфере карьера не превышала предельно допустимой. Остановка вентилятора на 30—40 мин приводила к быстрому повышению концентрации оксидов азота на всех горизонтах карьера. При возобновлении работы вентиляторов через 40—50 мин концентрация вредных газов достигала уровня ПДК даже при работе всего автотранспортного парка [205].

Положительный опыт вентиляции Саамского карьера убедительно показал перспективность и целесообразность применения вентиляторов с винтами большого диаметра для интенсификации воздухообмена в карьерах при условии учета конкретных горнотехнических условий, четкой организации работ и предварительного научного обоснования мероприятий по вентиляции. Однако на других карьерах не удалось достичь столь очевидного положительного эффекта по следующим причинам: 1. В испытаниях участвовало не более 1—2 вентиляторов, что было явно недостаточно для организации надежного воздухообмена, учитывая размеры карьеров. 2. Отсутствовала предварительная проектная проработка системы вентиляции в тесной увязке с ведением горных работ, что значительно затрудняло оптимальное расположение вентиляторов в карьерах и формирование эффективных схем проветривания. 3. В карьерах не было системы оперативного контроля содержания вредных примесей в атмосфере, позволяющей объективно оценивать динамику концентрации вредных примесей. 4. Серьезным методическим недостатком было преобладание эмпирического подхода к решению сложной проблемы искусственного воздухообмена в загрязненных зонах карьера. Недостаточная теоретическая проработка исследуемых вопросов приводила к ошибкам при проектировании и испытаниях. Для разработки эффективных систем вентиляции необходимо при проектировании дать обоснованную оценку интенсивности вентиляционных потоков, создаваемых вентилятором в окружающей атмосфере.

Карьерный вентилятор с вертолетным винтом создает в окружающем пространстве помимо сильно турбулизированной вертикальной струи бесконечное поле течения, направленное к струе и винту вентилятора. Струя, за счет трения на границе, непрерывно вовлекает в себя окружающий воздух, а винт подсасывает его вследствие создаваемого разрежения. Эти потоки, несмотря на их сравнительно небольшую скорость в удалении от вентилятора, охватывают огромные объемы и являются основными переносчиками вредных примесей в атмосфере карьера, а струя осуществляет вертикальное перемещение их за пределы карьера.

Ввиду небольшой скорости вторичных потоков и структурной упорядоченности, проявляющейся в отсутствии крупномасштабной турбулентности, к их анализу с достаточным приближением можно применить теорию потенциальных полей. В этом случае задача расчета скоростного поля сводится к отысканию функции тока (или потенциала) течения.

Течение вне турбулентной области круглой струи, истекающей из точечного источника в безграничное или ограниченное пространство, исследовалось в различной постановке в ряде работ по механике жидкости [206—208]. Сложное поле течения к винту и струе вентилятора можно смоделировать потоком к системе стоков, непрерывно распределенных вдоль оси z цилиндрической системы координат, начало которой выбирается в точке установки вентилятора на поверхности земли. Интенсивность стоков, имитирующих подсасывание винта и помещенных ниже его, можно считать постоянной по высоте и определять по формуле

$$q_n = Q_0/h, \quad (4.51)$$

где Q_0 — объемный расход воздуха в плоскости винта, $\text{м}^3/\text{с}$;
 h — высота подвески винта, м.

Интенсивность стоков вдоль оси струи также будет постоянной ввиду линейной зависимости расхода от длины струи. Ее можно определить, воспользовавшись одним из известных решений для пограничного слоя струи [152]:

$$q_c = \frac{dQ_z}{dz} = \frac{4,36aQ_0}{d_0}, \quad (4.52)$$

$$Q_z = 4,36Q_0 \left(\frac{az}{d_0} + 0,145 \right), \quad (4.53)$$

где Q_z — объемный расход по длине струи, м³/с; a — коэффициент турбулентной структуры; d_0 — диаметр вента вентилятора, м.

В безвихревом осесимметричном потоке функция тока в цилиндрической системе координат удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (4.54)$$

Решение уравнения (4.54) проведено методом функций Грина для полупространства $V (z > 0)$ в виде [209].

$$\psi = \int_0^{\infty} G(r, z, \xi) g(\xi) d\xi \quad (4.55)$$

при краевых условиях $\psi = 0$ при $z = 0$, $\psi \rightarrow \infty$ при $z \rightarrow \infty$, где $g(\xi)$ — производительность стоков на единицу длины вдоль оси Z ; ξ — произвольная точка помещения стока единичной производительности на оси Z .

Интегрируя уравнение (4.55) в заданных пределах и выполняя тождественные преобразования, получаем алгебраическое уравнение для функции тока [210]

$$\psi = \frac{q_n - q_c}{4\pi} \left\{ \left[(z-h)^2 + r^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[(z-h)^2 + r^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} - \frac{q_c}{2\pi} z. \quad (4.56)$$

На рис. 4.20 приведен график функции тока поля течения для вентилятора ВУ-21, построенный по формуле (4.56). Численные значения q_n и q_c составляют, соответственно, 50,4 и 52,3 м²/с.

Линии тока, соответствующие постоянным значениям функции, служат наглядным представлением поля вентиляционных потоков в окружающей атмосфере. Отчетливо выделяются две области течения — к центру и струе вентилятора, — разграниченные на рис. 4.20 пунктирной линией.

Высота зоны подсосывания вента постепенно увеличивается по мере удаления от вентилятора и на расстоянии 100 м достигает 40 м, в дальнейшем оставаясь практически постоянной. Таким образом, значительный объем карьера на нижних горизонтах будет проветриваться за счет нисходящих потоков к венту, а верхняя часть — за счет течения к струе вентилятора.

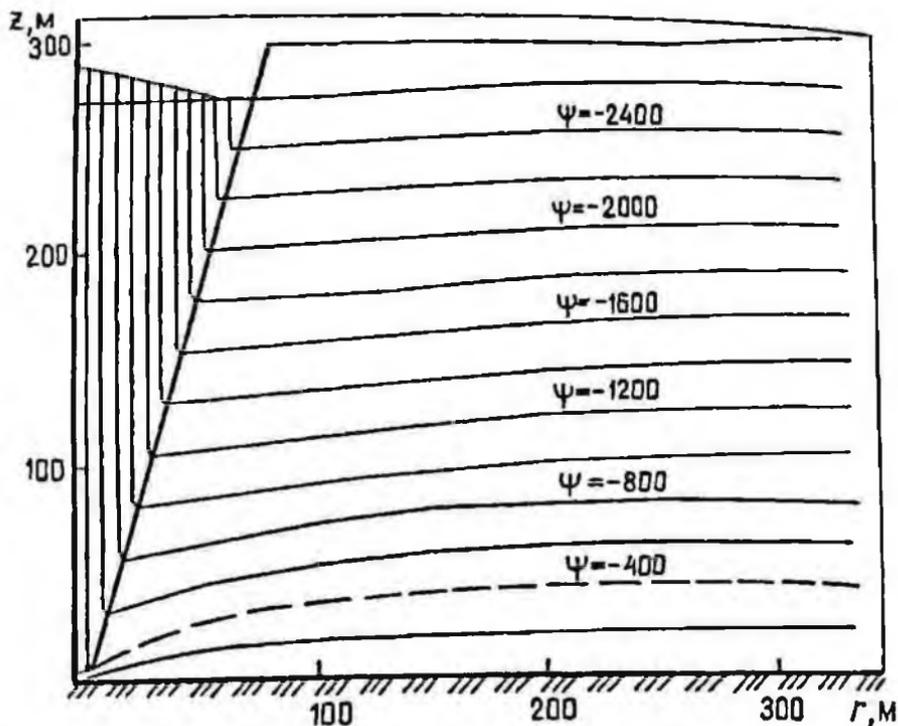


Рис. 4.20. График функции тока поля течения для вентилятора ВУ-21

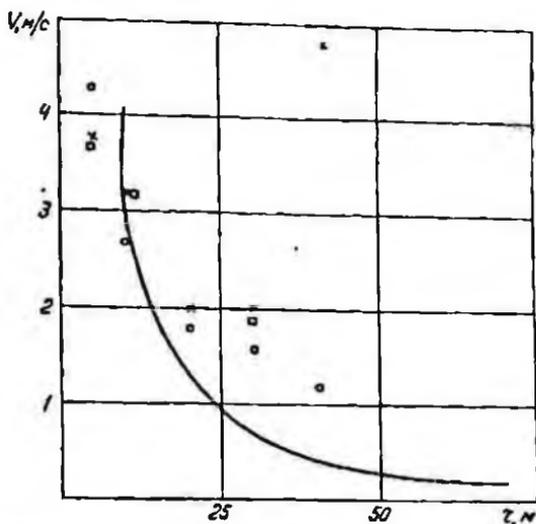
Составляющие скорости в любой точке поля можно определить дифференцированием функции тока 4.56 по координатам [210]:

$$v_z = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{q_n - q_c}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(z-h)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z+h)^2 + r^2}} \right), \quad (4.57)$$

$$v_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{q_n - q_c}{4\pi r} \left(\frac{z-h}{\sqrt{(z-h)^2 + r^2}} - \frac{z+h}{\sqrt{(z+h)^2 + r^2}} \right). \quad (4.58)$$

Полученные формулы позволяют рассчитать поле скоростей вентиляционных потоков для любого вентилятора, если известны значения q_n и q_c . Для проверки предложенных зависимо-

Рис. 4.21. Скорость эжекции воздуха винтом вентилятора (построен по экспериментальным точкам)



стей на рис. 4.21 построена кривая изменения скорости воздуха на уровне поверхности земли для вентилятора ВУ-21, рассчитанная по формуле 4.57, на график нанесены экспериментальные точки. Результаты экспе-

римента хорошо совпадают с теоретической зависимостью вблизи винта установки. В области малых скоростей имеется расхождение, объясняемое допущениями при построении математической модели и ограниченной точностью результатов, полученных при натурном эксперименте. В таблице 4.8 приведен пример расчета по формуле (4.58) скорости воздуха в зоне эжекции винта на уровне поверхности земли для вентиляторов ВУ-14 и ВУ-21.

В табл. 4.9 представлены результаты расчета времени проветривания вентиляторами ВУ-14 и ВУ-21 загрязненных зон различного радиуса.

Скорость воздуха на расстоянии первых 100 м от вентилятора уменьшается в 30—40 раз до величины 0,1 м/с. В дальнейшем темп падения скорости снижается, и она медленно уменьшается асимптотически приближаясь к нулю. Соответственно, время проветривания с увеличением радиуса прогрессивно возрастает, достигая на расстоянии 500 м от вентиляторов нескольких часов. Если принять допустимое время проветривания после однократного загрязнения равным одному часу (после взрывных работ), тогда можно определить радиус зоны эффективного воздухообмена, интерполируя данные табл. 4.9. Для вентилятора ВУ-14 разница составит 220 м, а для ВУ-21 — 280 м. Такие размеры зоны недостаточны для эффективного проветривания большинства крупных карьеров при одиночной работе вентиляторов и ус-

Таблица 4.8
Скорость воздуха в зоне эжекции пинта вентиляторов ВУ-14 и ВУ-21, м/с

Тип вентилятора	Расстояние от вентилятора, м					
	10	20	30	40	50	60
У-14.5	2,05	0,66	0,35	0,23	0,17	0,13
ВУ-21	4,05	1,3	0,67	0,43	0,31	0,14

Тип вентилятора	Расстояние от вентилятора, м						
	70	80	90	100	200	300	400
ВУ-14.5	0,11	0,09	0,08	0,07	0,03	0,02	0,015
ВУ-21	0,19	0,16	0,14	0,12	0,05	0,03	0,020

Таблица 4.9
Время проветривания загрязненной зоны вентиляторами ВУ-14 и ВУ-21, мин

Тип вентилятора	Расстояние от вентилятора, м					
	100	200	300	400	500	600
ВУ-14	8,5	46,2	114,3	212,9	342	502
ВУ-21	3,8	26,2	68,3	129,5	212	314

тановке их на промежуточных горизонтах. Вентиляторы ВУ-14 и ВУ-21 наиболее целесообразно эксплуатировать на самых нижних горизонтах карьеров, где поперечные размеры позволяют организовать интенсивный воздухообмен или использовать их в комбинированных схемах проветривания в качестве воздуховыдающих.

Разработанная математическая модель и проведенный на ее основе анализ показали, что скорость вторичных вентиляционных потоков, индуцируемых струей, гиперболически убывает по мере удаления от источника.

ГЛАВА 5

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ СТРУЙ В КАРЬЕРАХ

5.1. Опыт применения струй при положительных температурах

Кондиционирование воздуха в рабочей зоне карьера, подавление витающей пыли и растворимых газов*

Воздушно-водяные струи вентиляторов-оросителей на базе авиационных ТВД могут быть эффективно использованы для теплового кондиционирования, подавления пыли и растворимых газов в атмосфере карьера [90, 92, 93, 211—213].

При распространении воздушно-водяных струй в карьерном пространстве происходит интенсивное (до 50 %) испарение воды. При этом процессы, происходящие в атмосфере обрабатываемой зоны, аналогичны процессам, протекающим в аппаратах для кондиционирования воздуха с применением воды. На рис. 5.1 представлены результаты промышленных экспериментов по кондиционированию атмосферы карьера Гороблагодатского рудоуправления (ГБРУ) с помощью вентилятора-оросителя НК-12КВ. При работе вентилятора происходит изменение как относительной влажности f (на 10—15 %), так и температуры воздуха T (на 2—4 К).

Если время обработки не превышало 30—40 минут, то скорость изменения температуры dT/dt и скорость изменения относительной влажности df/dt приобретали ход на уровнях, отличающихся от естественных. Так dT/dt устанавливалась на уровне 1,5—2,5 К ниже, а df/dt на 5—12 % выше по сравнению с естественным ходом.

Если время обработки увеличивалось до 1 часа, то df/dt увеличивалась в 2 раза, а dT/dt в 4 раза по сравнению с естественным ходом метеоэлементов.

Промышленные эксперименты по кондиционированию воздуха на карьере Целинного горно-химического комбината были проведены в 1978—1980 гг. На основании зондирования атмосферы карьера с помощью привязного радиозонда А-22 установлено, что в теплые периоды года при расходе воды в струе вентилятора НК-12КВ-1М $Q_{\text{в}} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ относительная влажность

*Написано совместно с канд. техн. наук А. И. Павловым.

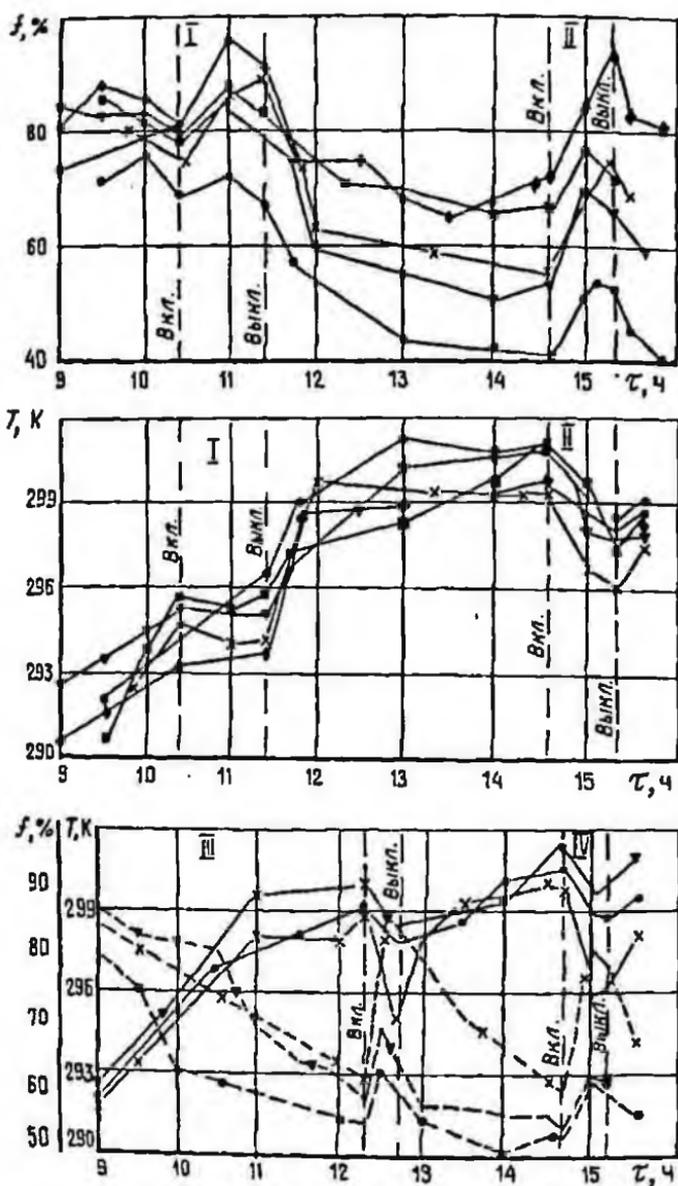


Рис. 5.1. Результаты экспериментов по кондиционированию атмосферы карьера ГБУ.

● — вентиляционная установка; ▼ — северный борг; x — дно карьера; ■ — западный борг; ◆ — пост № 23

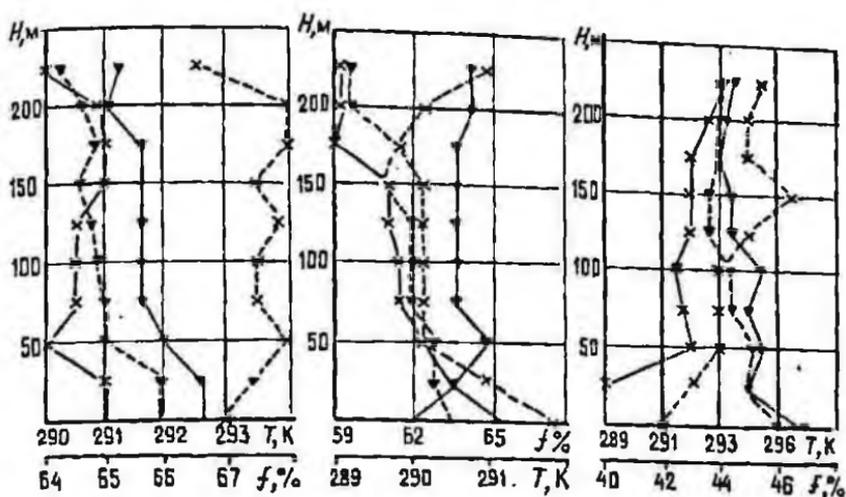


Рис. 5.2. Изменение параметров атмосферы карьера ЦГХК в результате воздействия воздушно-водяных струй.
 x — относительная влажность; ▼ — температура; — до эксперимента; - - - после эксперимента

воздуха в атмосфере карьера может быть увеличена на 3—6 % за 10—15 минут работы, а температура снижена на 0,6—1 °С (рис. 5.2). Режимы кондиционирования зон карьера можно варьировать в широком диапазоне за счет изменения расхода воды и скорости перемещения струй.

На рис. 5.3 показана работа системы искусственной вентиляции в оросительно-вентиляционном режиме. Промышленные эксперименты, проведенные на карьере ГБРУ, показали высокую эффективность вентилятора НК-12КВ-1М по кондиционированию воздуха и пылеподавлению [92, 93]. Запыленность воздуха определялась с помощью прибора ИЗВ-3 в трех точках. Расход воды в струе вентилятора составлял 0,05 м³/с.

Оценка результатов экспериментов по кондиционированию воздуха в атмосфере карьера ГБРУ, произведенная с помощью диаграммы комплексных температур [182], и пылеподавлению показала, что после обработки воздушно-водяной струей НК-12КВ-1М в течение 0,42 ч почти на всех рабочих местах обеспечиваются комфортные условия, а запыленность воздуха снижается в 4 раза (рис. 5.4).



Рис. 5.5. Работа вентилятора НК-12КВ в режиме генерирования восходящих "термиков"

При работе НК-12КВ-1М в режиме генерирования паро-воздушных струй (рис. 5.5) для определения количества воды необходимо учитывать ее фазовые превращения.

$$m_{\text{ж}} \leq \frac{C_{\text{г}} m_{\text{г}} T_{\text{г}}}{\lambda + C_{\text{ж}} \Delta T_{\text{ж}}}, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{г}}$, $C_{\text{ж}}$ — удельные теплоемкости газов реактивной струи и введенной в гидравлическое сопло воды, Дж/кг К;

$\Delta T_{\text{ж}} = T_{\text{к}} - T_{\text{ж}0}$ — изменение температуры воды, К;

λ — удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$T_{\text{к}} = 373$ К — температура кипения воды, К;

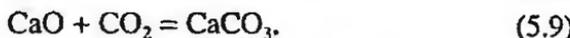
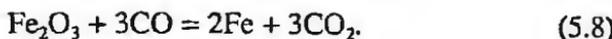
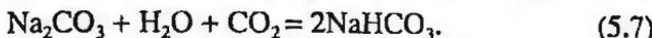
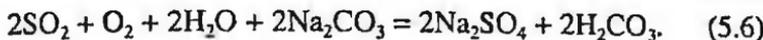
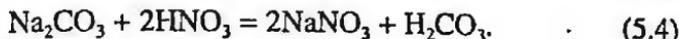
$T_{\text{ж}0}$ — начальная температура воды, вводимой в гидравлическое сопло, К;

$m_{\text{г}}$ — расход газов, кг/с.

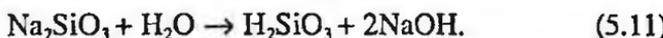
При $T_{\text{ж}0} = 303$ — 313 К; $m_{\text{г}} = 48$ кг/с; $T_{\text{г}} = 650$ К по формуле (5.1) $m_{\text{ж}} \leq 15$ кг/с.

Эффективность процессов пылегазоподавления можно повысить при дождевании рабочих зон карьера растворами солей

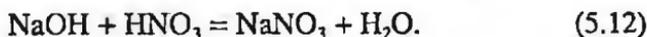
угольной и кремниевой кислот — $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, Na_2SiO_3 , K_2SiO_3 . Сажа, содержащаяся в отработанных газах автотранспорта, является хорошим неполярным адсорбентом для всех компонентов выхлопных газов. Окислы металлов (Fe_2O_3 , CaO , MgO и др.), содержащиеся в пылевых частицах, являются активными полярными адсорбентами. На витающих в воздухе частицах пыли и сажи при воздействии на них водных растворов солей и потоков воздуха происходят следующие химические реакции:



В водном растворе происходит гидролиз Na_2SiO_3 :



Реакция смещается вправо в результате нейтрализации щелочью азотной кислоты, образующейся из окислов азота:



При взаимодействии электролитов с кремневой кислотой H_2SiO_3 происходит ее коагуляция, в результате чего пылевые частицы и сажа с адсорбированными вредными примесями связываются гелем H_2SiO_3 в крупные агрегаты и осаждаются.

При введении в гидравлическое сопло вентилятора НК-12-КВ-1М водных растворов солей Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 за счет химических реакций (5.2)—(5.12) обеспечивается обезвреживание выхлопных газов ТВД вентилятора и улучшаются его санитарно-гигиенические характеристики.

Основной причиной образования токсичных аэрозолей являются фотохимические реакции, происходящие в воздухе при наличии в нем окислов азота. При окислении NO до NO_2 выделяет-

ся атомарный кислород, вступающий в реакцию с углеводородами и органическими соединениями, в результате чего образуются токсичные аэрозоли — пероксиацетилнитрат (ПАН), бензальдегид, бенз/а/ппрен, вызывающие раздражение слизистых оболочек в организме человека. Поскольку в гидравлическом сопле вентилятора и в воздухе, обрабатываемой растворами зоне обеспечивается нейтрализация окислов азота, предотвращается образование токсичных аэрозолей.

Закрепление пылящих поверхностей

Наблюдения показали, что в ряде случаев даже при неработающем оборудовании происходит загрязнение атмосферы карьеров пылью, которое увеличивается по мере возрастания скорости ветра. Предотвращение срыва пыли с поверхности земли может быть достигнуто путем поддержанием ее влажности в нужных пределах или укреплением связующими составами. Наиболее приемлемым закрепителем является битумная эмульсия 50—60 %-ной концентрации с удельным расходом битума 0,5—0,6 кг/м². Обладая хорошей устойчивостью против ветровой эрозии (при скоростях ветра до 15 м/с) и способностью восстанавливать свои первоначальные свойства после увлажнения поверхности, эмульсия образует на поверхности устойчивую пленку. Битумная эмульсия обычно наносится на поверхность уступов с помощью гидромониторов. Производительность этого способа нанесения эмульсии составляет 0,6 м²/с при расходе эмульсии 9,1 л/с. Наряду с очевидными преимуществами, этот способ имеет ряд недостатков: это прежде всего низкая производительность и необходимость устройства автодорог вдоль обрабатываемых поверхностей вследствие малой дальности струи гидромонитора (25—30 м).

Способ нанесения эмульсии с помощью струйных вентиляторов имеет ряд принципиальных преимуществ: 1) отсутствует необходимость в специальных распылительных форсунках и соплах; 2) обеспечивается равномерное нанесение эмульсии на больших площадях и на значительном удалении от установки; 3) благодаря тонкому распылению жидкости обеспечивается закрепление крутых склонов, покрытых плохо смачиваемой (гидрофобной) пылью. Вентилятор АИИ-20КВ, оборудованный специальным соплом, позволяет с одного места установки обрабатывать эмульсией до 15000 м² при производительности 10—15 м²/с. В 70-х годах были проведены промышленные испытания установки АИИ-20КВ

для закрепления семян многолетних трав на откосах Соколовско-Сарбайского комбината. Вентилятор устанавливался у подошвы отвала и создавал восходящую воздушно-эмульсионную струю, направление которой в вертикальной и горизонтальной плоскостях изменялось с помощью гидросистемы (рис. 5.6).

Результаты проведенного эксперимента позволили сделать вывод о целесообразности использования струйных вентиляторов типа АИ-20КВ для укрепления откосов отвалов из песчаных и глинистых грунтов с помощью различных химических реагентов, а также для гидропосева семян трав с одновременным внесением минеральных удобрений и связующих эмульсий. В этом случае вентилятор АИ-20КВ оборудуется специальной гидравлической системой, смесительное сопло которой обеспечивает снижение температуры газов реактивного выхлопа с целью исключения порчи семян. Для закрепления поверхности откосов отвалов может быть использован состав гидросмеси, предложенный ВНИИ транспортного строительства. Расход компонентов (из расчета на 1 м²):

Битумная эмульсия, дм ³	1,0
Латекс, кг.....	0,04
Минеральные удобрения, кг.....	0,02—0,06
Опилки, кг.....	0,4
Солома, кг.....	0,2
Вода, кг.....	5,0

Приведенный способ химико-биологической рекультивации поверхностей отвалов (и нарушенных поверхностей вообще) должен получить особенно широкое применение в районах Курской магнитной аномалии и Кривого Рога, где жилые районы находятся в непосредственной близости к отвалам и хвостохранилищам, подверженным ветровой эрозии.

Наиболее благоприятным периодом для выполнения работ по биологической рекультивации нарушенных горными работами земель методом пневмогидропосева следует считать раннюю весну или позднюю осень, т. е. периоды выпадения наибольшего количества осадков и умеренных температур.

Перед нанесением химических реагентов целесообразно определять влияние физико-химических свойств пород на процесс их естественной коагуляции. Поэтому применение вышеуказанных стабилизаторов требует дальнейших дополнительных исследований в сухостепной зоне Казахстана.

При рекультивации вытянутых в плане одноярусных отвалов установка АИ-20КВ располагается на верхней площадке на рас-



Рис. 5.6. Момент закрепления семян многолетних трав на откосе юго-восточного отвала ССГОКа с помощью воздушно-эмульсионной струи, создаваемой с помощью вентилятора АИ-20КВ

Рис. 5.7. Технологическая схема закрепления одноярусных отвалов

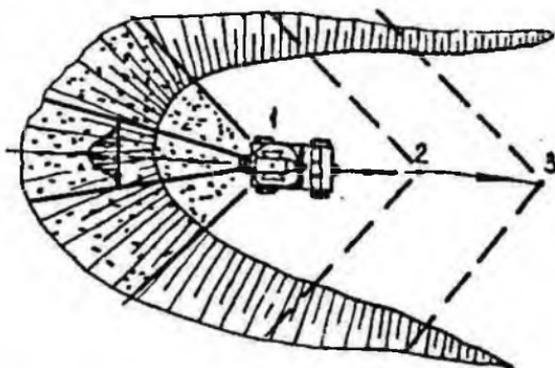
стоянщи 100—150 м от края (рис. 5.7). Равномерное распределение гидросмеси по поверхности достигается поворотом установки в горизонтальной плоскости,

изменением угла наклона струи в вертикальной плоскости, а также изменением режима работы турбовинтового двигателя. После нанесения гидросмеси на участок поверхности с позиции 1 установка перемещается на 100—150 м, и обрабатывается следующий участок (позиция 2) и т. д. Благодаря передвижению достигается высокая производительность установки.

Химико-биологическая рекультивация многоярусных отвалов начинается с нижнего горизонта. После завершения обработки откосов и бERM всех ярусов отвала установку переносят на верхнюю площадку, технология обработки которой описана выше.

Применение указанного способа наиболее эффективно при совмещении работ по отвалообразованию и рекультивации. Основанием для выбора совмещенного и последовательного проведения рекультивационных работ является оптимальный режим формирования отвального пространства по периодам эксплуатации месторождения.

Смесительное сопло карьерных вентиляторов на базе турбовинтовых двигателей должно обеспечивать снижение температуры транспортирующего потока с целью заключения вредного теплового воздействия на семена. Гидравлическая схема установки состоит из бака для гидросмеси, пневмоэмульгатора, вмонтированного в бак, пульпового центробежного насоса, смесительного сопла и системы трубопроводов с арматурой управления. Наиболее важным элементом этой системы является смесительное сопло эжекторного типа (рис. 5.8). Габаритные размеры сопла были приняты из конструктивных соображений, обеспечивающих плавный вход воздуха из струи воздушного винта в канал 1, образованный внутренней стенкой гидросопла 2 и поверхностью



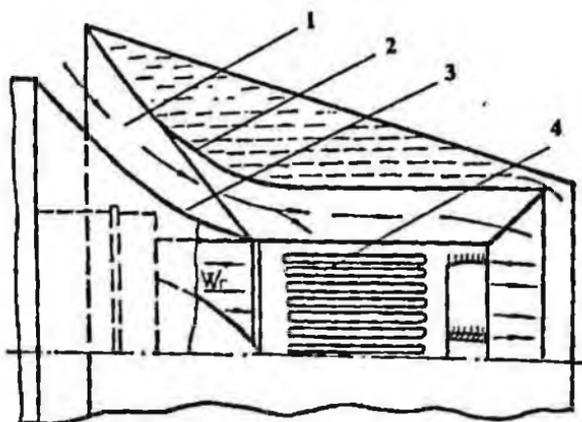


Рис. 5.8. Схема гидравлического сопла для химико-биологической обработки пылящих поверхностей

конуса-стекателя 3 капота авиадвигателя. Эжектируемый через канал 1 воздух создает в начальном сечении струи защитный слой воздуха, предохраняющий семена от прямого контакта с горячими газами реактивного выхлопа; предварительное охлаждение газов происходит также за счет смешения с воздухом, поступающим в поток через щели реактивного насадка 4.

Аэродинамические расчеты, обоснование конструктивных элементов аэрогидросопла, технологии выполнения работ по закреплению поверхностей отвалов рыхлых пород на карьерах ССГОКа приведены в работах [214, 215]. Начальную скорость струи аэрогидросмеси определяем из закона сохранения количества движения, который в нашем случае может быть записан в следующем виде:

$$(\Sigma m) \cdot U_{\text{см}} = m_{\text{гс}} U_{\text{гс}} + (m_{\text{н}\Sigma} + m_{\text{г}}) U_{\text{смз}}, \quad (5.13)$$

$$U'_{\text{см}} = \frac{m_{\text{гс}} U_{\text{гс}} + (m_{\text{н}\Sigma} + m_{\text{г}}) U_{\text{смз}} + m_{\text{г}} C_{\text{гп}} t_{\text{г}}}{m_{\text{гс}} C_{\text{ггс}} + m_{\text{н}\Sigma} C_{\text{гн}} + m_{\text{г}} C_{\text{гг}}}. \quad (5.14)$$

При этом температура аэрогидросмеси в начальном сечении струи определяется по правилу Рихмана

$$t_{\text{см}} = \frac{m_{\text{гс}} C_{\text{ггс}} t_{\text{гс}} + m_{\text{н}\Sigma} C_{\text{гн}} t_{\text{н}} + m_{\text{г}} C_{\text{гп}} t_{\text{г}}}{m_{\text{гс}} C_{\text{ггс}} + m_{\text{н}\Sigma} C_{\text{гн}} + m_{\text{г}} C_{\text{гп}}}. \quad (5.15)$$

В аэродинамических расчетах сопла и расчетах по определению температуры аэрогидросмеси использованы следующие параметры:

- Σm — суммарный расход смеси, кг/с;
- $U_{сн}$ — начальная скорость струи аэрогидросмеси, м/с;
- $m_{гг} = 30$ — расход гидросмеси, кг/с;
- $U_{гг} = 18$ — скорость истечения гидросмеси, м/с;
- $m_{в\Sigma} = 45,7$ — суммарный расход воздуха через эжектор, кг/с;
- $m_{г} = 20$ — расход газов реактивного выхлопа, кг/с;
- $U_{св\Sigma} = 113,6$ — скорость истечения газоздушнoй смеси из эжектора с учетом потерь, м/с;
- $C_{ргг} = 4103$ — удельная теплоемкость гидросмеси, Дж/(кг·град);
- $t_n = 20$ — температура окружающего воздуха, °С;
- $C_{рг} = 1102,12$ — удельная теплоемкость газов реактивного выхлопа, Дж/(кг·К);
- $t_r = 410$ — температура газов реактивного выхлопа, °С;
- $C_{рв}$ — удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг·град.

Расчеты показали, что средняя скорость истечения аэрогидросмеси из смешительного сопла составляет 85,5 м/с, температура при условии полного смешения в начальном сечении струи составляет 64 °С. Таким образом, принятые нами размеры смешительного сопла обеспечивают снижение температуры газов до приемлемого значения при достаточно высокой скорости струи аэрогидросмеси.

Для закрепления нарушенной поверхности земли, откосов отвалов горных пород может быть использован состав гидросмеси, предложенный Всесоюзным научно-исследовательским институтом транспортного строительства. В качестве примера приводим расход этого состава из расчета на 1 м²:

Мульчирующие материалы, кг:	
опилки	0,400
солома.....	0,200
Пленкообразователи:	
битумная эмульсия, м ³	0,001
латокс (сухое вещество), кг	0,040
Вода, м ³	0,005
Минеральные удобрения, кг.....	0,02—0,06

Опыты по закреплению подвижных песков нэрозином (сланцевая смола полукоксования) проводились в совхозе "Аксарайский" Астраханской области (Габай В. С., ВАСХНИЛ). Нэрозин наносился на пески полосами тракторным опрыскивателем или авианопрыскивателем. Ширина полос 4,5—8,6 м, расстояние меж-

ду шири 10,1—13,5 м. Междуполосные расстояния засеваются многолетними травами или кустарниками. Расход нэрозина 3 т га. Производительность при авиаопрыскивании 6,2 га/ч. После опрыскивания получается прочный скрепленный слой песка. Стоимость закрепления 1 га нэрозином 150 руб. Нэрозин может быть использован для закрепления поверхностей отвалов и подой хвостотраплиц, являющихся источником загрязнения атмосферы карьеров и промплощадок пылью.

Дегазация взорванной горной массы*

Известно, что большая часть продуктов взрыва выбрасывается в атмосферу и рассеивается. В то же время часть взрывных газов остается в междукосовых пространствах и адсорбируется отбитым материалом.

Интенсивность диффузионного выделения ядовитых газов зависит: от метеоусловий, при которых произведен взрыв, а также от количества и вида ВВ, физико-механических свойств горных пород и степени их дробления.

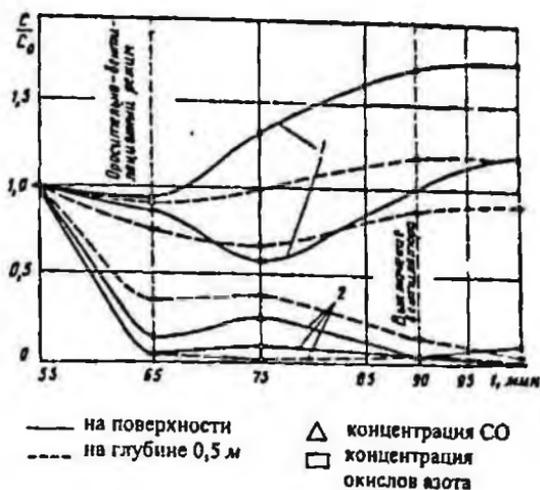
При воздействии на поверхность взорванной горной массы воздушного потока в наружном слое развала возникает разрежение, за счет чего процесс диффузии газов из глубины массива к поверхности интенсифицируется.

При естественном проветривании процесс газовыделений из взорванного массива протекает длительное время. По результатам экспериментов на карьерах комбинатов Ураласбест и Соколовско-Сарбайского, концентрация окислов азота превышает предельно допустимые нормы в течение 6—10 часов, а окиси углерода — в течение 100—120 часов. Для того чтобы исключить отравление горнорабочих в процессе экскавации и сократить время простоя, целесообразно применять принудительную дегазацию взорванных блоков.

При промышленных экспериментах одновременно на двух взорванных блоках спустя 10—15 мин. На поверхности и на глубине 0,5 м определялись концентрации окиси углерода и окислов азота. Один из блоков дегазировался естественным путем, другой обрабатывался в течение 10 минут воздушно-водяной, а в дальнейшем воздушной струей вентилятора АИ-20КВ. Результаты анализов представлены на рис. 5.9. Из графиков следует, что время дегазации взорванной горной массы при обработке ее

*Написано совместно с канд. техн. наук А. И. Павловым.

Рис. 5.9. Характер изменения концентрации окиси углерода и окислов азота на поверхности и глубине 0,5 м взорванной горной массы без орошения и вентиляции (1) и с орошением и вентиляцией (2) на Соколовско-Сарбайском комбинате



воздушно-водяной струей значительно сокращается. Аналогично протекает этот процесс и в глубине взорванной горной массы. Момент рабо-

ты вентилятора в режиме дегазации взорванного блока на Центральном карьере комбината Ураласбест показан на рис. 5.10.

На Северном горно-обогатительном комбинате проведена серия экспериментов по дегазации взорванной горной массы с помощью вентилятора ОВ-3. Пробы отбирали в нескольких точках как на поверхности взорванного блока, так и с глубины 1,8—2 м (через трубы, забиваемые во взорванную горную массу). Одновременно замеряли скорость воздушного потока как по проветриваемой части взорванного блока, так и на контрольном участке, дегазируемом естественным путем. На рис. 5.11 показана эффективность принудительной дегазации взорванного массива.

Таким образом, проведенные на разных предприятиях с применением различных вентиляторов эксперименты по дегазации и обеспыливанию отбитой горной массы свидетельствуют о высокой эффективности предложенного способа. Полностью исключая возможность отравления горнорабочих при экскавации взорванной горной массы, этот метод позволяет в 3—5 раз сократить время простоя оборудования после массового взрыва [212, 213].

В тех случаях, когда применение воздушно-водяных струй оказывается невозможным, проветривание зоны взрыва может быть осуществлено воздушной струей, разбавляющей вредные примеси или выносящей их в ветровой поток. Промышленные испытания этого метода проводились на карьерах комбината Ураласбест как при траншейных, так и при фронтальных массовых взрывах.

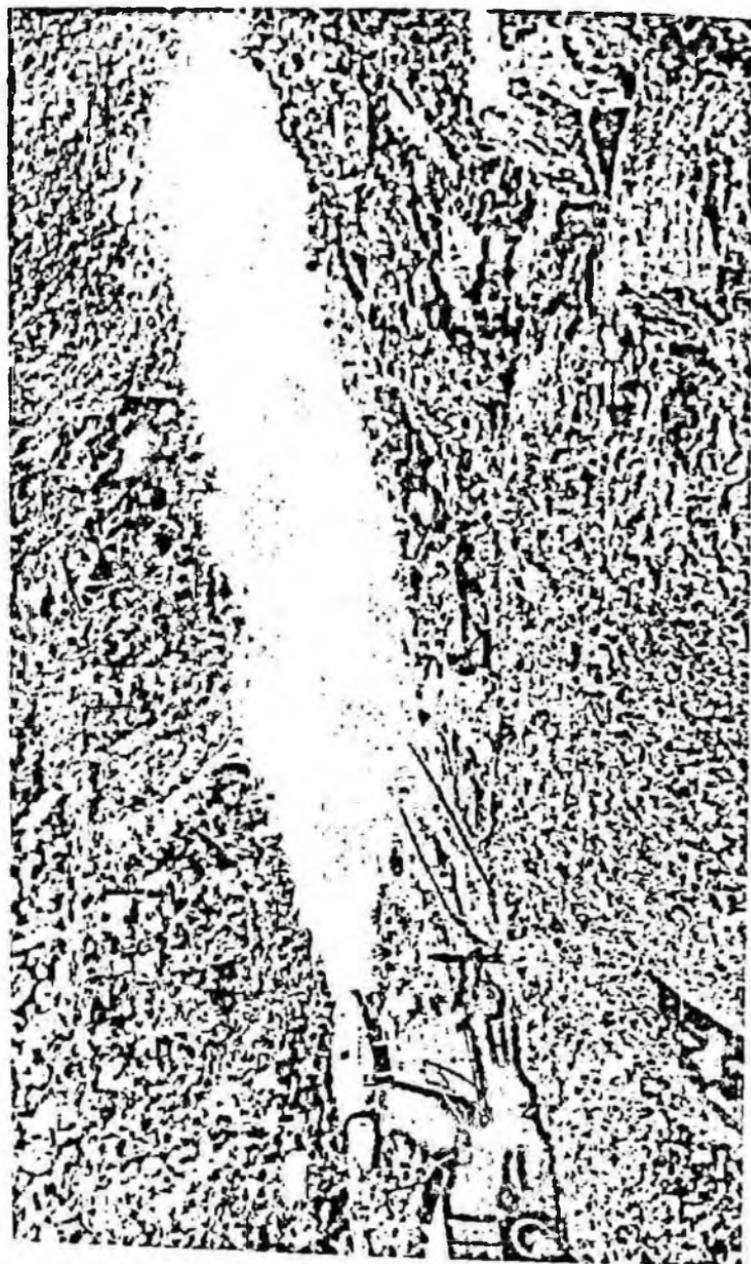
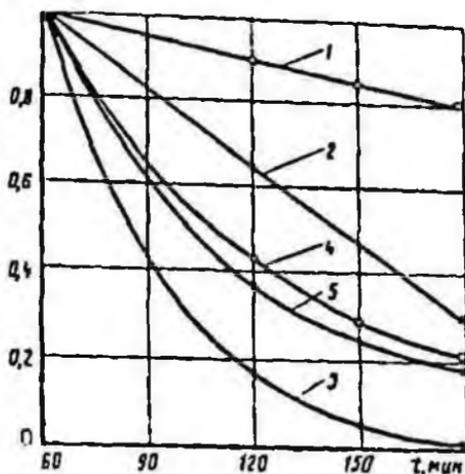


Рис. 5.10. Обработка взорванной горной массы воздушно-водяной струей

Рис. 5.11. Снижение концентрации окиси углерода при естественном проветривании:

1 — во взорванной горной массе; 2 — на поверхности горной массы и при искусственном проветривании (установка ОВ-3); 3 — на поверхности горной массы; 4 — во взорванной горной массе, $U = 6-7$ м/с; 5 — во взорванной горной массе, $U = 9-12$ м/с



При отсутствии ветра и наличии температурной инверсии загазованность атмосферы в районе массового взрыва сохраняется в течение 8—24 часов. Примером может служить массовый взрыв (39 т ВВ), произведенный в Асбестовском карьере в феврале 1970 г. на гор. 120 м. Пылегазовое облако вследствие низкого уровня конвекции не было выброшено за пределы карьера, в результате чего произошло общее загрязнение атмосферы выше предельно допустимых значений, несмотря на то, что в карьере фиксировался ветер 0,5 м/с. По этой причине горные работы были прекращены с 17.00 до 24.00 часов. В то же время при еще более сложной ситуации (инверсия, штиль), сложившейся в карьере в декабре 1970 г., применение вентилятора АИ-20КВ позволило в течение 40 минут ликвидировать загазованность и предотвратить неизбежный простой. В контрольной зоне, проветриваемой естественным путем, опасная загазованность сохранялась в течение нескольких часов.

Весьма показателен также эксперимент по проветриванию района массового взрыва на карьере Центрального рудоуправления комбината Ураласбест в июне 1970 г. Был взорван блок на западном борту карьера на глубине 150 м. Заряд ВВ составлял 36680 кг. Скорость ветра в районе массового взрыва была равна 1,8 м/с, температура воздуха +23 °С. После массового взрыва образовался развал длиной 300 м, шириной 25 м, на поверхности которого были определены концентрации окиси углерода и окислов азота. Вентилятор работал 45 минут, после чего вновь отбирались пробы.

Из приведенных данных следует, что за время работы вентилятора объемная концентрация ядовитых газов в точках, нахо-

дящихся в зоне искусственного проветривания (точки 3—6), значительно снизилась (по СО в 5—20 раз, по окислам азота в сотни раз), в то же время в точках 1 и 2, находящихся в зоне естественного проветривания, концентрация окиси углерода снизилась приблизительно в 2 раза, а окислов азота — в 5—10 раз.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о целесообразности применения при проветривании карьеров не только воздушно-водяных, но и воздушных струй.

5.2. Исследование, разработка и внедрение систем пылегазоподавления при отрицательных температурах в карьерах (на примере карьера ПГХК)

Описание объекта исследований системы пылегазоподавления

Использование локальных средств пылегазоподавления является недостаточным для нормализации атмосферы в периоды длительных штилей. Применение в эти периоды систем искусственной вентиляции позволяет получить положительный эффект за счет выноса загрязняющих веществ за пределы карьера. Однако, учитывая требования по охране окружающей среды, системы искусственной вентиляции карьеров, предусматривающие вынос вредных компонентов за пределы карьерного пространства, признать оптимальным решением проблемы нельзя. Наиболее перспективными представляются в настоящее время способы, предусматривающие активное подавление вредностей искусственно создаваемыми осадками [203]. Основой данного способа является воспроизведение с помощью технических средств в объеме карьера или его рабочей зоны известного в природе процесса вымывания из атмосферы вредных примесей осадками [215—219]. Практическая реализация способа стала возможной с созданием мощных карьерных вентиляторов-оросителей НК-12КВ и их модификаций [94, 149].

Базой для создания системы пылегазоподавления в карьере, явились функционирующая там система вентиляции на базе вентиляторов НК-12КВ-1М. Целесообразность создания системы обусловлена спецификой выделяющихся в атмосферу карьера вредностей, очень малым количеством выпадающих в зоне осадков (в среднем до 4,4 мм/мес) и глубиной карьера, достигшей 180 м. В период с марта по ноябрь в карьере, как правило, складывается наиболее тяжелая пылегазовая обстановка, среднемесячные значения повторяемости штилей с инверсиями составляют 40 %.

При наличии положительного опыта использования вентиляторов НК-12КВ в качестве генераторов осадков в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации, необходимые для разработки технологии процесса пылегазоподавления. В первую очередь это касается вопросов генерирования и переноса искусственно создаваемых осадков газовой струей вентиллятора НК-12КВ и процессов пылегазоподавления при отрицательных температурах воздуха.

Улучшения санитарно-гигиенического состояния атмосферы карьера в зимний период можно достичь применением системы пылегазоподавления, принцип действия которой основан на очистке атмосферы карьера от вредных примесей искусственными осадками, создаваемыми карьерными вентилляторами-оросителями НК-12КВ-1М. Такая система — впервые в практике открытых горных работ — была смонтирована в ноябре 1987 г. (рис. 5.12 и 5.13, табл. 5.1). К началу испытаний один из вентилляторов был установлен на предохранительной берме гор. +630 м, другой — на гор. +600 м. Превышение высот между резервуаром, установленным на поверхности (гор. +730 м), и вентилляторами составляет 100 и 130 м. Водораспылительное устройство (сопло) конструкции ИГД МЧМ СССР (рис. 5.14) было совмещено с реактивным соплом двигателя вентиллятора.

Работа системы в режиме генерирования осадков осуществляется следующим образом. После включения двигателей вентилляторов и выхода их на рабочий режим открываются задвижки сначала на подводящих трубопроводах, а затем на магистральном. Вода самотеком заполняет водопроводы и под напором поступает к водораспылительным соплам. Под воздействием высокоскоростной реактивной струи вода дробится на мелкие капли, которые затем транспортируются двухфазной струей, формируемой воздушным винтом и реактивным соплом вентиллятора (рис. 5.15). Обработка атмосферы карьера производится перемещением струи в горизонтальной плоскости.

Анализ зарубежной и отечественной научно-технической и патентной информации показал, что аналогичные промышленно освоенные системы пылегазоподавления в мировой практике отсутствуют. По вопросам формирования в природе жидких и твердых осадков и их влияния на окружающую среду имеются достаточно обширные теоретические и экспериментальные исследования. Накоплен определенный опыт борьбы с пылью при отрицательных температурах воздуха с применением искусст-

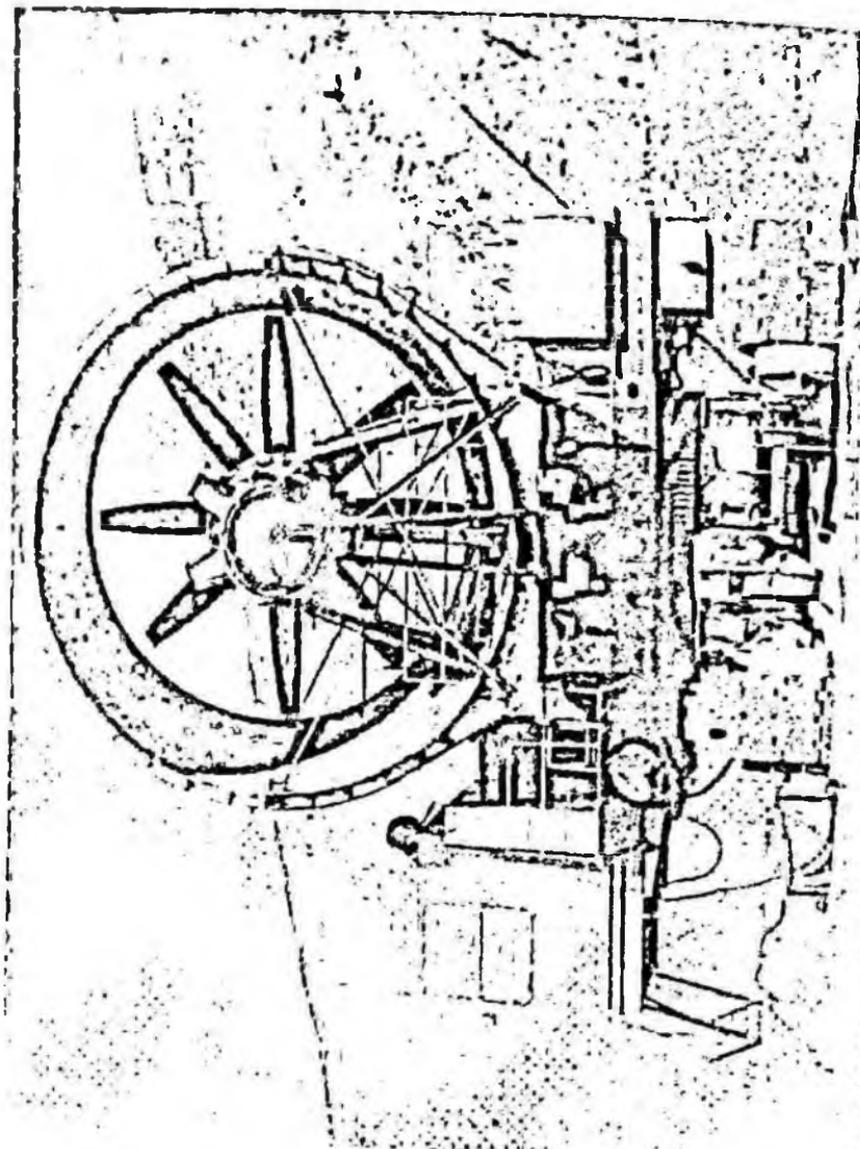


Рис. 5.12. Генератор искусственных осадков — карьерный вентилятор-ороситель НК-12КВ-1М

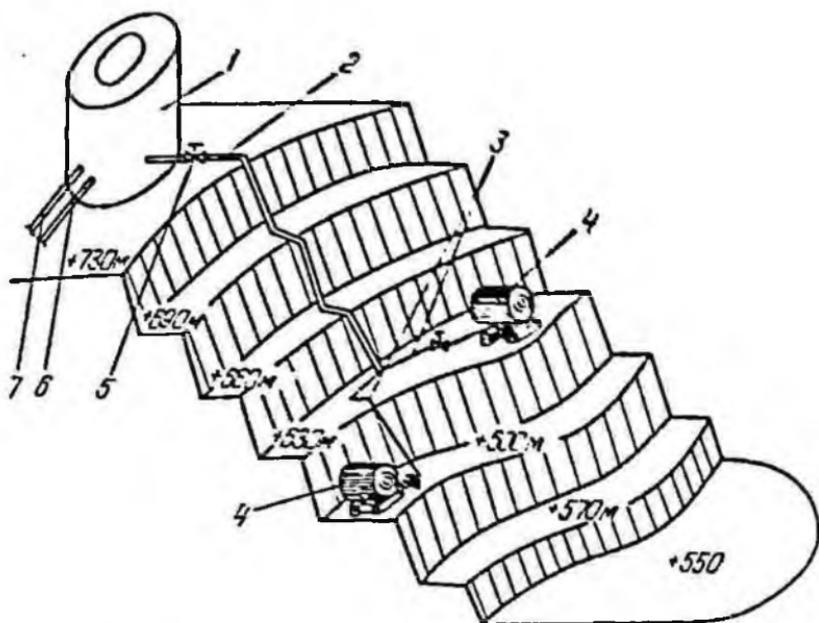


Рис. 5.13. Схема системы пылегазоподавления в карьере ПГХК:
 1 — резервуар для воды; 2 — магистральный водосток; 3 — подводящие трубопроводы; 4 — генератор осадков; 5 — задвижка; 6 и 7 — трубопроводы для подвода горячей и холодной воды

венного снега [220, 221]. Однако имеющиеся в данных работах материалы не содержат сведений, достаточных для разработки технологии процесса пылегазоподавления с учетом особенностей формирования и переноса осадков двухфазными струями. Поэтому наши исследования преследовали цель теоретически и экспериментально обосновать параметры процесса пылегазоподавления при отрицательных температурах воздуха с использованием генератора осадков — карьерного вентилятора НК-12КВ-1М. Для технологии, отвечающей современному научно-техническому уровню, необходимо было решить следующие задачи:

- разработать теоретическую модель процесса искусственного генерирования и переноса твердых осадков двухфазной струей вентилятора НК-12КВ-1М;
- определить рациональные технические параметры системы пылегазоподавления, отработать технологию ее применения и оценить эффективность нормализации атмосферы карьера;
- разработать новые технические решения, направленные на повышение эффективности процесса пылегазоподавления;

Таблица 5.1

Технические данные системы пылегазоподавления карьера ПГХК

Элемент системы	Показатель
Генератор осадков	Карьерный вентилятор НК-12КВ
Мощность двигателя вентилятора, кВт	11000
Тип создаваемой вентилятором струи.....	Газовоздушная
Массовый расход, кг/с:	
воздуха.....	2000
газов.....	55
Массовый расход топлива, кг/ч.....	2300
Емкость резервуара для воды, м ³	410
Магистральный водоспуск	
длина, м.....	170
внутренний диаметр, мм.....	257
Горизонтальные трубопроводы	
длина, м.....	60
	100
внутренний диаметр, мм.....	147
Напор воды, кг/см ² (кПа)	10,0 (980)
Объемный расход воды через водораспы- лительное сопло, м ³ /ч.....	300

— разработать рекомендации по рациональной эксплуатации системы пылегазоподавления с учетом горнотехнических и климатических условий карьера.

Анализ процессов естественного образования твердых осадков и их адсорбционные свойства

Различные виды осадков в естественных условиях образуются в тех случаях, когда возникают восходящие вертикальные движения воздушных масс, ведущие к охлаждению воздуха вследствие его квазиадиабатического расширения. Известны четыре типа вертикальных атмосферных движений, связанных с процессами осадкообразования [217]. Три из них представляют практический интерес для искусственной генерации осадков.

Горизонтальная конвергенция развивается при формировании области низкого давления, при этом в приземном слое создаются условия для развития восходящих движений воздуха. Орографический подъем и охлаждение воздуха наблюдаются, когда воздушные массы преодолевают естественные препятствия (горы, гряды или группы холмов), в результате чего происходит интенсивная конденсация и выпадение осадков. Конвективный подъем возникает при неравномерном нагреве земной поверхно-

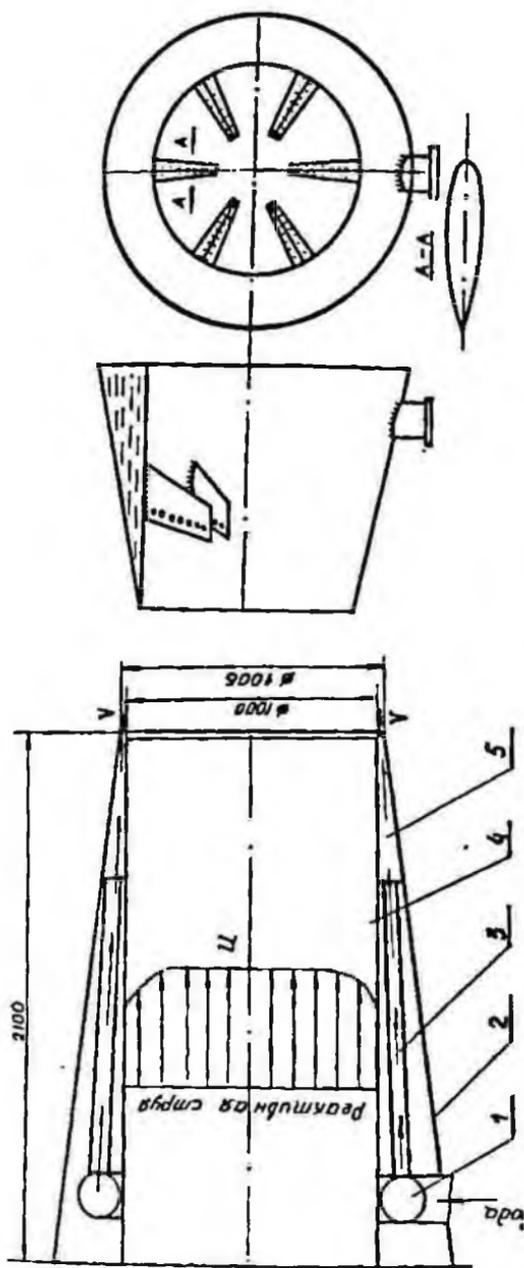


Рис. 5.14. Гидравлические сопла вентиляторов НК-12КВ:

1 — коллектор; 2 — наружный кожух сопла; 3 — каналы подвода распылителей; 4 — реактивные сопла; 5 — расширяющееся сопло



Рис. 5.15. Воздушная струя, создаваемая генератором осадков НК-12КВ-1М

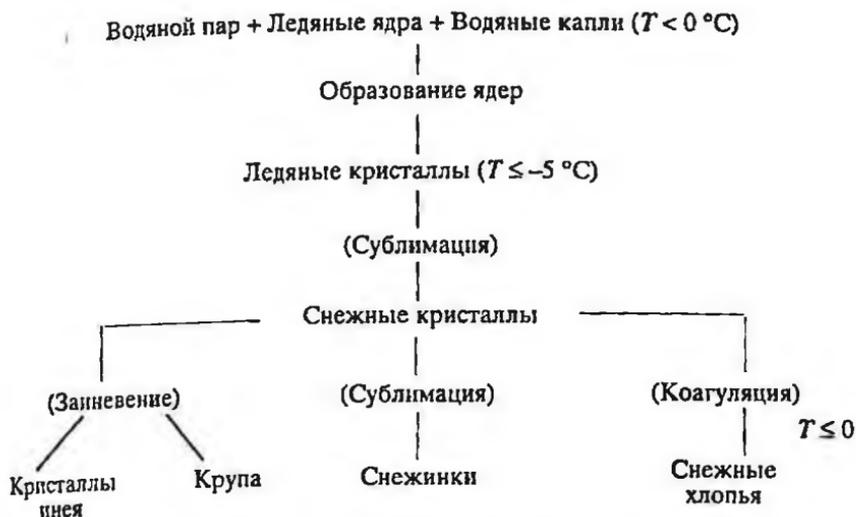


Рис. 5.16. Схема образования снежных осадков

сти. В образующихся восходящих потоках формируются локализованные области конденсированного пара (облака типа кучевых), из которых при отрицательной температуре выпадают снежные осадки.

Схема формирования снежных осадков. Формирование снежных осадков в атмосфере зависит от многих факторов, но главным образом — от температуры окружающей среды и наличия переохлажденной влаги (рис. 5.16). Первоначально в воздушной массе возникает перенасыщенная влагой область, где происходит интенсивная конденсация водяных паров и формируется локализованное атмосферное образование облачного типа. Если температура в этом образовании ниже 0°C , создаются условия, благоприятные для зарождения твердых осадков. При температуре около -5°C ядра кристаллизации, всегда присутствующие в атмосфере, вызывают интенсивный процесс формирования мельчайших кристаллов льда. С ледяных кристаллов начинается образование снежного кристалла — снежинки. Начальный диаметр его обычно меньше 75 мкм. Форма кристалла очень простая [222]: обычно это шестиугольная пластинка, которая в процессе роста превращается в снежинку. В процессе коагуляции снежинок образуются снежные хлопья. Если снежинка находится определенное время в области с высокой концентра-

щей облачных капель и ее размеры превышают 300 мкм, мелкие капли размером до 40 мкм замерзают при соприкосновении с ней. Этот процесс происходит, как правило, при температурах от -5 до -20 °С и приводит к образованию инея или снежной крупы. Таким образом, снежные осадки могут состоять из снежинок, снежных хлопьев, кристаллов инея, снежной крупы, или обломков этих частиц.

Рассмотрим теперь подробнее перечисленные выше процессы.

В нижних слоях атмосферы во взвешенном состоянии всегда обнаруживаются аэрозольные частицы, большая часть которых, как установлено в работе [195], имеет размеры от 10^{-2} до 1 мкм. Частицы, на которых конденсируется водяной пар, являются ядрами конденсации.

Ядрами кристаллизации являются частицы, вокруг которых образуется лед либо в процессе замерзания обычных капель, либо в процессе осаждения пара на поверхность охлажденных частиц. Ядрами кристаллизации могут служить пылевые частицы естественного и искусственного происхождения. Концентрация активных ядер кристаллизации быстро возрастает с понижением температуры воздуха. Например, в интервале от -10 до -30 °С она возрастает в 10 раз при понижении температуры на каждые 4 °С [223]. Концентрация ядер сильно меняется во времени и пространстве в зависимости от метеоусловий.

Установлено, что химический состав ядер кристаллизации весьма разнообразен; каждое из них характеризуется своей температурой, при которой начинается процесс льдообразования. Наиболее эффективны ядра, действующие при температуре от -5 до -10 °С.

Процесс кристаллизации с участием инородных частиц-ядер называется гетерогенным; в атмосфере при $T > -40$ °С происходит именно гетерогенная кристаллизация влаги. При температуре ниже -40 °С процесс образования ледяных частиц возможен без ядер кристаллизации, т. е. является гомогенным.

Ледяной кристалл, находящийся в переохлажденном капельном конденсате (облаке), интенсивно растет за счет присоединения капель. При рассматриваемых температурах пересыщение влаги в облаке по отношению к поверхности льда составляет 10—30 %. В результате наблюдается отток водяного пара от капель к ледяному кристаллу. Рост кристалла в переохлажденном капельном конденсате является основой механизма, предложен-

ного Бержероном [224] для объяснения процесса образования осадков. В этих условиях кристаллы весьма быстро достигают размеров, при которых начинается их выпадение. Форма ледяного кристалла определяется температурой, а скорость сублимационного роста и вторичные особенности формы зависят от степени пересыщения. Различия формы ледяных кристаллов обусловлены зависимостью от температуры, относительных скоростей роста его граней. Кристаллы могут быть призматическими или пластинчатыми в зависимости от того, какие грани растут быстрее. При температуре от 0° до -4° C преобладают пластинчатые формы, от -4 до -10° C — призмы, спирали и иглы, от -10 до -20° C — пластинки, а от -20 до -35° C — полые столбики [223].

Скорость роста общей массы кристалла m за время t вследствие диффузии (сублимации) водяных паров на его поверхность определяется выражением

$$dm/dt = 4\pi C D F A_c (\rho_{\infty} - \rho_0), \quad (5.16)$$

где C — коэффициент формы кристалла;

D — коэффициент диффузии паров в воздухе;

F — аэродинамический коэффициент, зависящий от скорости движения кристалла относительно воздуха;

A_c — функция поверхности и коэффициента аккомодации (зависящего от температуры и состояния поверхности);

ρ_{∞} — абсолютная влажность в потоке;

ρ_0 — абсолютная влажность на поверхности кристалла.

Уравнение (5.16) справедливо, если диаметр кристалла не превышает нескольких сотен микрон. При больших размерах захват облачных капель или коагуляция кристаллов в процессе падения становятся основными факторами, определяющими рост общей массы кристалла.

В процессе падения кристалл при наличии переохлажденных капель растет за счет столкновения с ними. Эффективность столкновения определяется как отношение числа капель, захваченных кристаллом, к общему числу капель в внутри столба воздуха, сечение которого равно поперечному сечению кристалла, а высота расстоянию, которое пролетел кристалл. Эффективность рассматриваемого процесса зависит также от отношения числа захваченных кристаллом капель к общему числу капель, которые сталкивались с ним. Значение этого параметра, как правило, близко к единице. Размеры кристаллов, для которых рассматриваемый процесс роста является доминирующим, 200—

300 мкм. В процессе замерзания капель на поверхности кристалла происходят вторичные выбросы ледяных частиц и интенсифицируется процесс образования твердых осадков.

Изменение массы кристалла, падающего в переохлажденном пространстве, вследствие заиндивения описывается формулой

$$dm/dt = Cab\omega W, \quad (5.17)$$

где C — коэффициент, характеризующий форму и объем кристалла;

a — эффективность сцепления;

b — эффективность столкновения;

ω — скорость падения кристалла относительно капель;

W — водность конденсата.

Коэффициент C пропорционален квадрату или кубу характерного линейного размера кристалла. В связи с этим из уравнения (5.17) следует, что скорость роста массы сильно возрастает с увеличением размера частиц. Так, кристалл радиусом 250 мкм, как показывают расчеты, может достичь размера 1—2 мм в течение 10—20 минут.

Рост снежных хлопьев в результате коагуляции и снежных кристаллов при их прохождении через область с высокой концентрацией снежинок также может быть описан уравнением (5.17).

Установлено, что численное значение эффективности захвата меняется от 0,1 до 1 и зависит от температуры и электрического поля кристалла. Кроме того, на основе экспериментальных исследований установлено, что притяжение между движущимися кристаллами проявляется на расстоянии до 30—40 диаметров, что повышает вероятность столкновения частиц. Наблюдения показывают, что размеры снежных хлопьев максимальны при температуре, близкой, но меньшей 0 °С. Установлено также, что чем большее расстояние они проходят, тем больших размеров они достигают. При температуре выше 0 °С хлопья быстро тают и выпадают в виде капель дождя.

Роль снежных осадков в очистке атмосферы. Снег захватывает при выпадении разнообразные диспергированные вещества и аэрозоли, а также ионы и изотопы газов. Концентрация примесей в снеге тесно связана с их концентрацией в атмосфере, поскольку снежинки и хлопья падают медленнее капель и дольше находятся в контакте с примесями. Установлено, что эффективность вымывания примесей снежными осадками размером 1—

10 мм не зависит от формы снежинок и возрастает при уменьшении их диаметра, но не падает ниже 0,1 для частиц размером 0,3—0,5 мкм. Таким образом, выпадение снега приводит к интенсивному очищению атмосферы от примесей, концентрируя их в снежном покрове.

В последнее время ведутся широкие исследования, направленные на поиск эффективных способов инципирования и увеличения количества снежных осадков. Основное направление исследований — это поиск искусственных ядер конденсации, которые можно было бы эффективно использовать для воздействия на облака. Испытывались многочисленные органические и неорганические смеси, установлены их пороговые температуры кристаллизации [195, 223]. В настоящее время наиболее широкое применение нашли два реагента: твердая углекислота и йодистое серебро, которые используются для воздействия на естественные переохлажденные облака с целью инципировать их кристаллизацию и вызвать выпадение осадков.

Из изложенного выше следует, что для формирования твердых осадков непосредственно в атмосфере карьера необходимо соблюдение следующих условий: 1. Температура воздуха в карьере должна быть отрицательной. 2. В атмосфере карьера или определенной ее части должна возникнуть устойчивая во времени область перенасыщенная влагой (при данной отрицательной температуре). 3. Наличие в этой области достаточного числа ядер кристаллизации для интенсивного развития процесса снегообразования. Тип, размеры и интенсивность снежных осадков определяются рядом условий, назначение которых подробнее будет рассмотрено позднее.

Карьерные вентиляторы-оросители НК-12КВ можно успешно использовать как устройства для всесезонного пылегазоподавления [94, 171].

Теоретическая модель искусственного генерирования и переноса твердых осадков в атмосфере карьера

Метод искусственного генерирования снежных осадков и основанный на нем способ пылегазоподавления заключается в следующем. В атмосферу рабочей зоны карьера при отрицательных температурах воздушной струей вентилятора подается достаточная масса диспергированной жидкости (воды). Вследствие турбулентного перемешивания в струе формируется перенасыщенная паром и каплями жидкости смесь. Концентрация капель

и степень насыщения смеси паром, а также ее температура изменяются при перемещении по оси струи, но имеют в каждом сечении в среднем (по времени) определенные постоянные значения. Изменение параметров водо-воздушной струи происходит за счет вовлечения присоединенных масс воздуха, теплообмена и выпадения части капель из струй.

Капли жидкости, переносимые струей, участвуют в интенсивном турбулентном теплообмене с более холодным воздухом: часть из них быстро охлаждается, отдавая тепло воздуху; другая часть испаряется, насыщая вовлеченный в струю воздух водяным паром. В зависимости от расхода воды, степени ее диспергированности и температуры, а также влажности и температуры окружающего воздуха один из двух процессов теплообмена оказывается доминирующим. В любом случае часть капель еще в струе охладится до 0°C и даже переохладится. Поскольку в струе всегда имеются ядра кристаллизации, то в движущемся конденсате неизбежно начнутся процессы образования и роста ледяных частиц, особенно на граничных поверхностях струй. Основная масса выпавших из струи капель опускается вниз, обтекаемая ламинарным потоком воздуха. В процессе падения капли, находящиеся в жидком фазовом состоянии, сначала охлаждаются до 0°C , а затем происходит кристаллизация, формирование и рост снежнок. Одновременно с процессами образования снежных осадков происходит, как отмечалось ранее, эффективное вымывание вредностей из атмосферы благодаря большой адгезионной способности снежных частиц.

При рассмотрении процессов искусственного генерирования и переноса твердых осадков воздушно-водяной струей карьерного вентилятора на базе турбовинтового двигателя (ТВД) необходимо учитывать следующие обстоятельства. Воздушно-водяная струя вентилятора формируется в результате распыления жидкости и представляет собой многокомпонентную смесь, состоящую из капель жидкости, водяного пара, реактивных газов и воздуха. Диспергация жидкости происходит вследствие кратковременного процесса взаимодействия жидкости с высокотемпературной струей отработавших газов ТВД, истекающих из сопла со скоростью, близкой к звуковой.

Анализ экспериментальных и теоретических данных о процессах естественного образования осадков, а также выполненные ранее эксперименты [94, 171] и визуальные наблюдения по искусственному генерированию и переносу осадков с помощью

воздушных струй карьерных вентиляторов НК-12КВ и АИ-20КВ позволяют предложить следующую теоретическую модель процессов искусственного образования и переноса осадков. Данная модель учитывает технические характеристики воздушных струй, создаваемых карьерными вентиляторами на базе ТВД, и основные атмосферные параметры. Особенность способа искусственного генерирования и переноса осадков с помощью воздушных струй на базе ТВД состоит в том, что при его реализации формируются два различных по своим аэродинамическим и теплофизическим свойствам, участка переноса и образования осадков — начальный и основной. Эти участки значительно различаются по интенсивности и направлению протекающих в их пределах процессов теплообмена между жидкостью и газовой струей.

Предлагаемая схема процессов генерирования и переноса осадков такова (см. рис. 5.15). На начальном участке струи вентилятора перенос образующейся в процессе распыления капельной смеси осуществляется за счет кинетической энергии реактивной составляющей струи — смесь движется в четко локализованном конусе реактивных газов. Для этого участка струи характерны очень большие, недостижимые в обычных природных условиях скорости тепло- и массообмена. Граница начального участка зависит от секундного массового расхода и температуры нагреваемой жидкости. Для вентиляторов на базе ТВД размеры активной, начальной, части струи составляют примерно 5—6 калибров. При движении капель жидкости в струе реактивных газов интенсивность теплообмена, в частности процесса испарения и насыщения смеси паром, на один-два порядка больше, чем на основном участке [157]. Связано это с тем, что взаимодействие жидкости с высокотемпературной ($t_R \geq 320$ °С) высокоскоростной струей газов вызывает весьма интенсивное нагревание и испарение образовавшихся капель жидкости. Если расход жидкости достаточно велик, то смесь жидких капель и пара уже в конце начального участка, оказывается в состоянии пересыщения водяным паром. Температура перенасыщенной смеси определяется секундным расходом и температурой подаваемой жидкости. При этом температура капельной смеси будет всегда выше температуры жидкости, но меньше температуры кипения воды при данном давлении.

На границе начального и основного участка конус струи реактивных газов заметно расширяется — происходит турбулент-

ный выброс пара и капель в спутную воздушную струю. Вследствие турбулентного перемешивания с воздушной струей скорость переноса капельного конденсата заметно падает. Так как скорость струи, создаваемой винтами, в 6—7 раз меньше скорости струй реактивных газов, начинается процесс выпадения капель. При этом наблюдается значительная диффузия водяного пара за пределы водяного конуса струи. Раскрытие реактивной струи на основном участке не приводит сразу к полному перемешиванию газовой и воздушной струи, и в газовой струе продолжает оставаться основная масса жидкости.

Так как интенсивность испарения и конденсационного роста капель на основном участке струи значительно меньше, то основная часть пара не успевает конденсироваться. Поскольку температура капель и пара в струе реактивных газов больше температуры вовлеченного воздуха, то в водяном конусе струи вентилятора на основном участке образуется состояние равновесного насыщения паром, но уже по отношению к смеси с более низкой температурой. В процессе движения на основном участке переноса часть пара диффундирует за пределы водяного конуса струи, а оставшийся пар конденсируется. Вследствие этого на кривой зависимости интенсивности выпадения осадков от расстояния до источника струи (вентилятора), имеющей ярко выраженный первичный максимум, формируется второй дополнительный максимум, но уже на значительно большем удалении от вентилятора. Этот эффект наблюдался в экспериментах по определению закономерностей переноса осадков струей вентилятора на базе ТВД и впервые описан в работе [171].

Уравнение теплового баланса процессов теплообмена между нагнетаемой жидкостью и газо-воздушными компонентами струи на основном участке переноса имеет следующий вид:

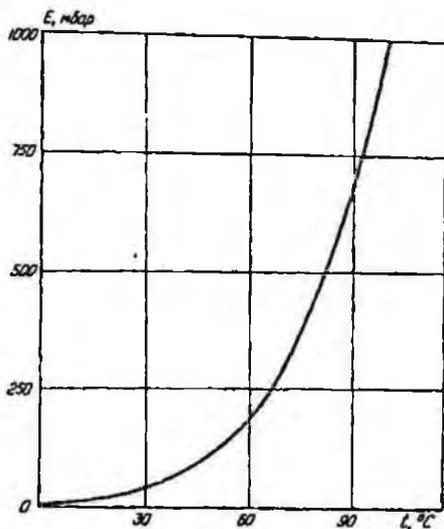
$$m_R C_R t_R + m_g C_g t_g + m_W C_W t_W = \\ = t_S [m_R C_R + m_g C_g + m_p (C_p - C_g) + m_W C_W] + \lambda m_p, \quad (5.18)$$

где m_R , m_g , m_p , m_W — соответственно, секундный массовый выброс реактивных газов, расход жидкости, образующегося водяного пара, масса вовлекаемого в единицу времени в водяной конус струи воздуха (кг/с);

C_R , C_g , C_p , C_W — соответственно, удельные теплоемкости газа, жидкости пара и воздуха (Дж/кг К);

λ — удельная теплота парообразования воды (Дж/К);

Рис. 5.17. Зависимость упругости насыщения водяного пара от температуры



t_g, t_s, t_w, t_s — температура газов, жидкости, воздуха и равновесной насыщенной паром капельной смеси ($^{\circ}\text{C}$).

Массу образующегося в единицу времени пара (m_p) можно найти, используя определение максимальной удельной влажности воздуха, имеющего температуру t_s , и соответствующую ей максимальную упругость насыщения водяным паром $E(t_s)$ [222, 226]. В рассматриваемом случае имеем

$$m_p \approx (m_R + m_W) \frac{0,622 E(t_s)}{p}, \quad (5.19)$$

где p — общее атмосферное давление (мбар),

Поскольку зависимость упругости насыщения водяного пара $E(t_s)$, как видно из рис. 5.17, является экспоненциальной, уравнение (5.18) представляет собой относительно t_s трансцендентное уравнение и может быть решено с достаточной степенью точности лишь в частных случаях.

В рассматриваемом режиме генерирования твердых осадков температура должна быть меньше 0° ($t_w < 0$). Учитывая, что обычно $m_g > m_R$, а $C_g \approx 4C_R = 4C_W$, получаем из (5.18) и (5.19) следующее приближенное соотношение, связывающее температуры воздуха, жидкости и газов:

$$t_s = \frac{m_R C_R}{m_g C_g + m_W C_W} t_R + \frac{m_g C_g}{m_g C_g + m_W C_W} t_g + \frac{m_W C_W}{m_g C_g + m_W C_W} t_w - \frac{\lambda'(m_W + m_R)}{m_g C_g + m_W C_W} \frac{E(0)}{p} \leq 0, \quad (5.20)$$

где $\lambda = 0,622 \lambda' \approx 1560$ кДж/кг.

Отсюда находим выражение, определяющее температуру жидкости, обеспечивающую работу вентилятора в режиме генерирования твердых осадков,

$$t_s \leq \frac{m_w C_w}{m_g C_g} |t_w| - \left\{ \frac{m_R C_R}{m_g C_g} t_R - \frac{\lambda (m_w + m_g) E(0)}{m_g C_g p(0)} \right\}. \quad (5.21)$$

Дальнейшие расчеты возможны лишь, если известна секундная масса воздуха (m_w), вовлекаемого на границе начального участка переноса в газовый конус струи. Экспериментальные наблюдения показывают, что угол раскрытия газо-водяного конуса зависит в основном от массового расхода и температуры вводимой в струю жидкости. Угол раскрытия конуса в спутном воздушном потоке составляет $10-12^\circ$, а масса вовлекаемого в него воздуха $35-40\%$ от массового расхода воздуха в начальном сечении струи. Таким образом,

$$m_w \approx (0,35 - 0,4) m_{w0} = (0,35 - 0,4) \cdot 2000 = (700 - 800) \text{ кг/с.}$$

Из условия, что максимальный секундный расход воды составляет 100 кг/с , $m_R = 55 \text{ кг/с}$, $t_R = 320^\circ \text{C}$, а $E(0)/p = 0,006$, по формуле (5.21) находим

$$t_s \leq 2,4(|t_w| - 11). \quad (5.22)$$

Это соотношение определяет предельно допустимую температуру жидкости при ее максимальном расходе (100 кг/с) и заданной температуре окружающего воздуха, когда вентилятор может эффективно работать в режиме генерирования твердых осадков: температура капельной смеси в конусе струи вентилятора $t_s \leq 0$. В этом случае подавляющая часть капель, выпадающая из струи, будет охлаждена до 0°C , а мелкие капли будут выпадать в виде ледяных частиц. Для того, чтобы процессы кристаллизации, формирования и роста снежинок полностью завершилось, необходимо, чтобы время свободного падения переохлажденных капель превышало время их кристаллизации. Время кристаллизации охлажденной до 0°C капли диаметром $1-2 \text{ мм}$ может быть определено из выражения [226]

$$\tau_{кр} \approx \frac{181}{|t_w|} \alpha^{4/3}. \quad (5.23)$$

При использовании этой формулы необходимо учесть, что температура окружающего воздуха t_w в процессе кристаллизации повышается. Эту величину можно приблизительно определить по формуле

$$\Delta t_w = \frac{\beta_{mg}}{v_k S C_w \rho_w}, \quad (5.24)$$

где β — теплота кристаллизации (Дж/кг);

ρ_w — плотность воздуха (кг/м³);

S — площадь выпадения осадков (м²);

v_k — средняя скорость свободного падения осадков (м/с).

По данным [223], средняя скорость падения твердых осадков диаметром (1—2 мм) составляет примерно (1—1,5) м/с. Используя эти данные и учитывая, что наиболее интенсивное выпадение осадков происходит на площади $S \approx 2 \cdot 10^4$ м, находим

$$\Delta t_w = (1,5 - 2) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.25)$$

Повышение температуры воздуха на 1,5—2 °С в объеме интенсивного выпадения твердых осадков порождает восходящий поток загрязненного вредными примесями воздуха. Этот поток не только выносит вредности из рабочей зоны карьера, но и повышает эффективность захвата вредностей формирующимися твердыми осадками, т. е. эффективность очистки атмосферы возрастает. Встречный восходящий поток уменьшает среднюю скорость падения осадков, т. е. увеличивает время контакта, а значит, и вероятность захвата вредностей.

Время падения определяется следующим выражением:

$$\tau = h/v_k, \quad (5.26)$$

где h — высота падения осадков, м.

Сравнивая формулы (5.23), (5.25) и (5.26), имеем

$$\frac{181d^{4/3}}{|t_w + 2|} < \frac{h}{v_k},$$

отсюда находим

$$t_w < - \left(2 + \frac{181d^{4/3}v_k}{h} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.27)$$

Поскольку высота падения капель в карьере ПГХК составляет примерно 90 м, из (5.27) получаем

$$t_w < -4^\circ \text{C}, \quad (5.28)$$

Соотношения (5.22) и (5.28) показывают, что в условиях этого карьера эффективная работа системы водоподготовки составляет примерно 400 м³, для более оперативного управления процессом генерирования снежных осадков в некоторых случаях целесообразнее изменять массовый расход жидкости.

Из общего выражения (5.21) получаем

$$m_g \leq m_w \frac{C_w |t_w|}{C_g t_g} - \left\{ m_R \frac{C_R t_R}{C_g t_g} - (m_w + m_R) \frac{\lambda}{C_g t_g} \frac{E(0)}{P} \right\}. \quad (5.29)$$

Это соотношение определяет секундный массовый расход жидкости для заданной температуры воздуха (t_w) и жидкости (t_g), обеспечивающий работу вентилятора в режиме генерирования твердых осадков. Подставляя численные значения постоянных параметров системы, находим

$$m_g \leq 200 \frac{|t_w| - 11}{t_g}. \quad (5.30)$$

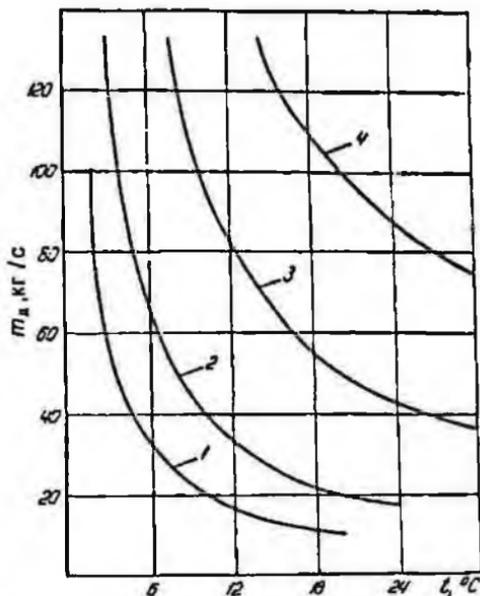
Зависимость (5.30) для различных температур окружающего воздуха представлена на рис. 5.18. Пользуясь этими графиками, нетрудно определить массовый расход, если известны t_w и температура подаваемой в струю жидкости.

На основе анализа экспериментальных данных и теоретических представлений о процессах теплообмена в турбулентной струе предлагается следующая модельная аналитическая зависимость, описывающая основные закономерности переноса и выпадения осадков:

$$f(R, \alpha) = f_0 \exp \left\{ - \frac{\left[(R-p)^2 - \Delta^2 \right]^2 + g(R-p)^3}{\left(1 + \frac{\alpha^2}{\alpha_0^2} \right) \delta^4} \right\}, \quad (5.31)$$

где R — радиус-вектор базисной плоскости цилиндрической системы координат, определяющий расстояние от источника струи — вентилятора до рассматриваемой точки в плане;

Рис. 5.18. Зависимость секунд-ного массового расхода жидкости от температуры жидкости при фиксированных температурах воздуха:
 1 — $t_a = -13^\circ\text{C}$; 2 — $t_a = -14^\circ\text{C}$; 3 — $t_a = -17^\circ\text{C}$; 4 — $t_a = -22^\circ\text{C}$



α — полярный угол цилиндрической системы координат, отсчитываемый от проекции оси струн на базисную плоскость до направления, лежащего в этой плоскости, радиус-вектора R .

Функция $f(R, \alpha)$ определяет значения интенсивности выпадения осадков из струв в зависимости от значения переменных R и α .

Величины $\rho, g, \alpha_0, \Delta, f, \delta$ являются параметрами аналитической зависимости (5.31) и могут быть определены по опытным данным.

Анализ выражения (5.31) показывает, что функция $f(R, \alpha)$ имеет три экстремальные точки, расположенные на проекции оси струв в базисной плоскости ($\alpha = 0$), которые находим из условия

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{df}{d\alpha} = 0 \quad (5.32)$$

из (5.32) получаем

$$\begin{cases} R_1 \equiv P - \frac{3}{4}g, \\ R_2 \equiv P, \\ R_3 \equiv P + g \frac{\Delta^2}{3g^2} \end{cases} \quad (5.33)$$

Значения R_1 и R_3 определяют положение локальных максимумов зависимости (5.31), а R_2 — положение минимума.

Значения, которые принимает функция $f(R, \alpha)$ в этих точках, таковы:

$$\begin{cases} f_{\max_1} \equiv f_0 e^{\frac{27R^4}{256\delta^4}}, \\ f_{\min_1} = f_0 e^{\frac{\Delta^4}{\delta^4}}, \\ f_{\max_2} \equiv f_0 e^{\frac{\Delta^4}{\delta^4} \left(1 - \frac{\Delta^2}{27g^2}\right)}. \end{cases} \quad (5.34)$$

При получении соотношений (5.33) и (5.34) для упрощения аналитических расчетов было использовано следующее приближение:

$$\Delta \ll g. \quad (5.35)$$

На рис. 5.19 изображена зависимость безразмерной функции $\varphi = f\left(\frac{R}{R_1}, 0\right) / f_{\max}$, из анализа, которой следует, что распределе-

ние интенсивности выпадения осадков существенно неравномерно. На рис. 5.20 показаны полученные в [171] зависимости средней интенсивности выпадения осадков из газозвдушной струи при различных значениях секундного массового расхода жидкости: эксперименты выполнялись с вентилятором АИ-20КВ. Сравнение этих данных с рис. 5.19 показывает, что изображенная на рис. 5.19 зависимость качественно верно описывает основные закономерности распределения осадков, выпавших из струи. Кроме того, анализ данных рис. 5.20 и соотношений (5.33), (5.34) позволяет определять характер зависимости основных параметров функции (5.31) от секундного массового расхода жидкости (m_g).

$$\begin{cases} q \equiv q_0 + \frac{1}{2} \frac{d^2 q}{dm_g^2} \Big|_0 (m_0 - m_{g0})^2 \\ f_0 = f_{00} + \frac{df_0}{dm_g} \Big|_0 (m_g - m_{g0}), \end{cases} \quad (5.36)$$

где m_{g0} — некоторый, оптимальный для данного технического устройства, секунднй расход жидкости.

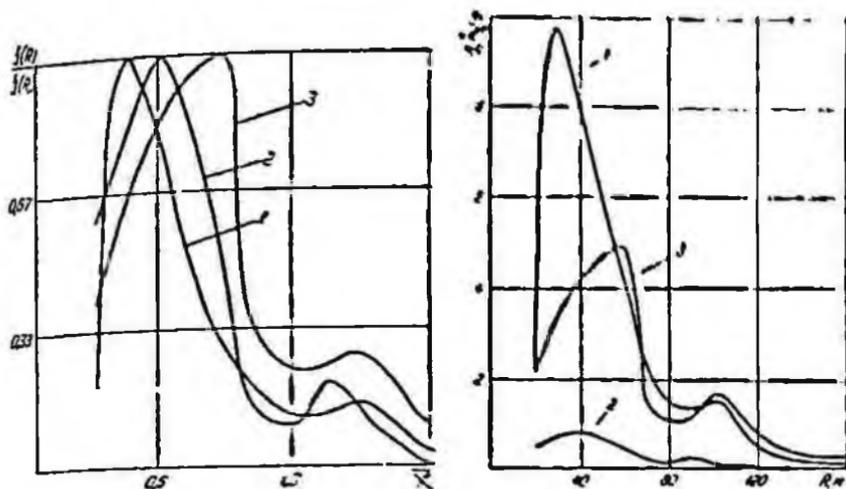


Рис. 5.19. Зависимость безразмерной интенсивности выпадения осадков $f(R)/f(R_1)$ от приведенного расстояния.

1 — $(m_1 - m_{opt})/m_0 = 0.55$; 2 — $(m_1 - m_{opt})/m_0 = -0.46$; 3 — $(m_1 - m_{opt})/m_0 = 0.16$.

Рис. 5.20. Зависимость средней интенсивности выпадения осадков от расстояния.

1 — $m_1 = 39.1$ кг/с; 2 — $m_1 = 13.6$ кг/с; 3 — $m_1 = 23.4$ кг/с

Действительно, из (5.33) и (5.36) следует

$$R_1 = \left(P - \frac{3}{4} q_0 \right) - \frac{1}{2} \frac{d^2 q}{dm_1^2} \Big|_0 (m_1 - m_{opt})^2. \quad (5.37)$$

Выражение (5.37) показывает, что при отклонении массового расхода (m_1) от оптимального (m_{opt}) расстояние R_1 , на котором происходит максимальное выпадение осадков из струи, уменьшается. Другими словами, дальность переноса осадков падает. Объясняется это тем, что при $m_1 > m_{opt}$ струя оказывается перегруженной и основная масса осадков выпадает в начале основного участка переноса. Если $m_1 < m_{opt}$, то происходит интенсивное испарение жидкости, причем количество образовавшегося пара возрастает по мере движения жидкости в струе на основном участке переноса. Обратный этому процесс — конденсация пара на периферийном участке переноса, благодаря которому формируется второй максимум на зависимости $f(R, \alpha)$, не может полностью компенсировать потери жидкости, так как часть пара диффундирует за пределы водного конуса струи.

Таким образом, для каждого технического устройства по переносу жидкости, в зависимости от режима его работы, можно определить оптимальный секундный расход жидкости, при котором дальность переноса генерируемых и равномерность их выпадения будут максимальными. Для вентиляторов на базе ТВД, как показывают расчеты, в режиме генерирования твердых осадков $m_{г0} \cong (1,35—1,40)m_R$, т. е. оптимальный расход жидкости должен превышать секундный расход реактивных газов на 35—40 %. Для вентплатора НК-12КВ $m_R = 55$ кг/с, следовательно, оптимальный расход жидкости равен 75—80 кг/с.

Экспериментальные исследования эффективности системы пылегазоподавления

Испытания системы (см. рис. 5.13) проводились с целью проверки работоспособности отдельных ее элементов, уточнения технических данных системы, исследования в натуральных условиях процесса образования искусственных осадков, их переноса и характера выпадения из двухфазной струи, оценки эффективности системы по нормализации атмосферы карьера.

Работоспособность элементов системы пылегазоподавления перед пуском оценивалась визуально: проверялось качество сварных швов, отсутствие утечек воды в местах соединения трубопроводов; отсутствие обратных уклонов на горизонтальных участках водоспуска.

Контроль расхода воды производился поплавковым устройством, установленным в резервуаре для воды. Цена деления мерной рейки 5 м³. Температура воды измерялась в 2-х точках: на верхнем горизонтальном участке водоспуска и в водопроводе непосредственно у вентилятора. Во 2-й точке измерялся также напор воды. Для измерения температуры воды использовались спиртовые термометры. Диапазон измерения температуры от 0 до +100 °С. Цена деления шкалы 1 °С. Напор воды измерялся манометром с ценой деления шкалы 0,1 кг/см².

Дальность переноса осадков определялась по минимуму их количества в мерных сосудах. Для определения характера переноса осадков мерные сосуды размещали на борту и дне карьера на проекции оси струй на расстоянии до 500 м с интервалом 10—30 м. Для оценки влияния угла наклона струй на характер распределения осадков по длине струй изменялся угол наклона платформы вентилятора от 0 до +15°. Измерения количества осадков производились после обработки части поверхности ка-

рьера, который представлял собой сектор круга с дугами $70-90^\circ$ (четверть круга). Время поворота струи между границей обрабатываемой поверхности составляло 15-20 минут. Как правило, задвигаясь до 10 фиксированных расстояний от 1-2-минутным интервалом работы вентилятора и клапанов.

Эффективность системы по нормализации атмосферы оценивалась путем отбора и анализа проб воздуха и раскисления лунной карьера в экскаваторных забоях у буровых скважин. Отбор проб производился на пыле, саже, окислы азота, окислы углерода и спешвердности с интервалом в 10-15 минут до начала во время и после работы вентиляторов в режиме генерирования осадков. Для отбора были привлечены работники ЦДБ предприятия. Отбор проб и их анализ производится по стандартным методикам, применяемым на предприятии.

Во время проведения экспериментов осуществлялся контроль метеопараметров атмосферы: температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, направления и скорости ветра. Контроль метеопараметров производился по данным срочных наблюдений местной метеостанции, расположенной в 1 км от карьера, и по результатам измерений непосредственно в карьере. Измерения в последнем случае выполнялись сотрудниками ЦДБ МЧМ СССР, ВНИИБТГ (г. Кривой Рог) и работниками лаборатории ЛРБ.

Первые испытания системы были проведены в декабре 1986 г. По техническим причинам в рабочем состоянии находился один вентилятор НК-12КВ-1М, установленный на гор. +630 м (см. рис. 5.13). В ходе испытаний были получены фактические технические показатели системы. Максимальный расход воды через водораспылительное сопло при работе двигателя вентилятора на режиме 0,85 номинального (рабочий режим) составил 250 м³/ч, что на 50 м³/ч меньше паспортного (см. табл. 5.1). выпадающие из струи осадки представляли собой снежную крупу с размером зерен до 1,5 мм. Следы выпадения искусственных осадков обнаруживались на расстоянии до 500 м от вентилятора. Интенсивность выпадения осадков на площади 78×10^3 м² на расстоянии 160 м от вентилятора составила 14,5 мм/ч, на расстоянии 240 и 320 м, соответственно, 4,0 и 1,0 мм/ч.

При движении воды от резервуара до водораспылительного сопла происходило понижение температуры воды на 2 °С. Испытания показали, что размещение водораспылительного сопла в контуре вентилятора приводит к попаданию воды на элементы

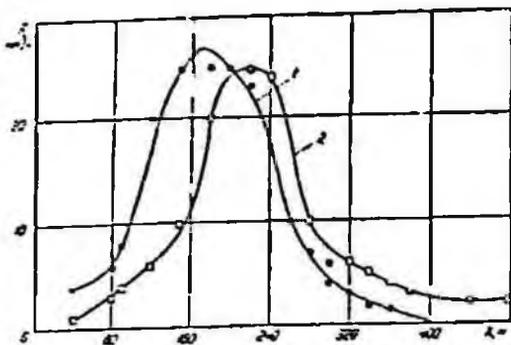
двигателя и к его обмерзанию. В связи с этим было принято решение об изменении конструкции сопла и расположения его вне кожуха вентилятора. Для оценки эффективности системы по нормализации атмосферы местом отбора пылегазовых проб был избран экскаватор ЭКГ-4,6, работавший на погрузке горной массы в забое, расположенном на гор. +550 м. Расстояние от вентилятора до экскаватора составляло по вертикали 80 м, по горизонтали — 120 м. Вентилятор работал в режиме генерирования снега два периода по 30 минут с интервалом в 75 минут. Температура воздуха в карьере на гор. +630 м составляла -13 — -14 °С, воды на входе в водораспылительное сопло $+10$ — $+11$ °С. Суммарный расход воды составлял 210 м³/ч. Скорость ветра на поверхности колебалась от 0 до 1 м/с. В карьере наблюдался полный штиль. Относительная влажность воздуха составляла 86 %, атмосферное давление 930 мбар. В периоды выпадения искусственного снега было зафиксировано в кабине и на площадке экскаватора снижение концентрации пыли в 6 раз, сажи — в 1,5 раза, СО и NO_x — в 2 раза. Снижения концентрации специфических веществ при данных испытаниях зафиксировано не было.

Летний этап испытаний системы был проведен в июне 1987 г. Целью данного этапа испытаний была проверка работоспособности выносного гидравлического сопла, созданного работниками карьера и установленного на вентиляторе, размещенном на гор. +630 м.

Сопло представляет собой кольцевой коллектор, закрепленный на расстоянии 100 мм от реактивного сопла двигателя. Подвод воды к коллектору осуществляется через два трубопровода диаметром 89 мм. Истечение воды происходит через щелевые прорези длиной 100—130 мм и шириной 10 мм, выполненные с интервалами 40—50 мм по окружности с внешней стороны коллектора. Данная конструкция обеспечивает расход воды до 300 м³/ч. При работе вентилятора в режиме генерирования осадков попадания воды на элементы двигателя не наблюдалось.

Кроме испытаний выносного водораспылительного сопла был исследован характер выпадения осадков по длине струи. На различном удалении от вентилятора были установлены 26 мерных сосудов. Измерение количества выпавших осадков производилось через 30—40 минут работы вентилятора в режиме генерирования осадков. Обрабатываемая поверхность представляла сектор круга с длиной дуги 75°. Время поворота воздушно-водяной струи между боковыми границами обрабатываемой поверх-

Рис. 5.21. Интенсивность выпадения искусственного снега при различных способах переноса осадков:
 1 — одной воздушно-водяной струей; 2 — спутными воздушно-водяной и воздушной струями



ности составляло 10 минут. Было задано 10 фиксированных положений струи с минутным интервалом работы в каждом. Обработка поверхности производилась при углах наклона платформы вентилятора $0-15^\circ$, и максимальном расходе воды $300 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Максимальная интенсивность выпадения осадков (рис. 5.21) наблюдается на расстоянии $120-160 \text{ м}$ от вентилятора. При этом, чем меньше угол возвышения струи, тем более равномерно по длине струи выпадают осадки.

В ходе промышленных испытаний системы были определены ее технические параметры, характер выпадения по длине струи осадков, эффективность очистки воздуха от вредных примесей. Результаты испытаний показали, что вентилятор, установленный на гор. $+630 \text{ м}$, обеспечивает обработку примерно $2/3$ площади рабочей зоны карьера и перекрывает зону действия вентилятора, установленного на гор. $+600 \text{ м}$. Для повышения эффективности использования вентиляторов — генераторов осадков, в частности, для обеспечения обработки осадками всей рабочей зоны, необходимо выбрать более рациональное размещение в карьере вентилятора, установленного на гор. $+600 \text{ м}$, разработать мероприятия по увеличению дальности переноса осадков и равномерности их выпадения по обрабатываемой площади.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов пылегазоподавления в атмосфере карьера при отрицательных температурах опубликованы в работе [227].

Разработка новых технических решений и рекомендаций по повышению эффективности применения системы пылегазоподавления

С учетом результатов теоретических исследований и промышленных испытаний системы пылегазоподавления предлагаются следующие технические решения, направленные на повышение

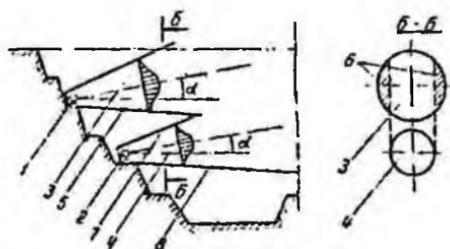


Рис. 5.22. Схема размещения вентиляторов НК-12КВ-1М при создании спутных воздушно-водяной и воздушной струй.

1, 2 — вентиляторы, создающие, соответственно, воздушно-водяную (3) и воздушную (4) струи; 5 — нижняя граница воздушно-водяной струи; 6 — периферийные участки воздушно-водяной струи; 7, 8 — верхняя и нижняя границы воздушной струи; α — угол наклона струи

ние эффективности применения в карьерах способа нормализации атмосферы искусственными осадками.

Для увеличения дальности переноса и равномерности выпадения осадков по длине транспортирующей их воздушно-водяной струи предлагается формировать под последней спутную воздушную струю [228]. Реализация данного технического решения осуществляется следующим образом. На борту карьера (рис. 5.22) размещают вентилятор 1, оборудованный системой подачи в воздушную струю мелкодисперсных капель воды. Под ним размещают в вертикальной плоскости по меньшей мере по одному вентилятору 2. Включением вентиляторов 1 и 2 одновременно создают в карьерном пространстве воздушно-водяные 3 и спутные им воздушные 4 струи. Движение капель воды в воздушно-водяной струе 3 первоначально совершается по инерции в направлении оси струи под углом α , затем под действием силы тяжести траектория движения капель отклоняется книзу и они выпадают из воздушно-водяной струи. При этом, чем ближе к нижней границе 5 воздушно-водяной струи 3 находились капли в начальный момент их движения, тем больше дальность переноса капель. Поскольку вентилятор 1 размещен на борту карьера выше вентилятора 2, а оси создаваемых ими струй 3 и 4 совмещены в одной вертикальной плоскости, то формируемая вентилятором 1 воздушно-водяная струя 3 перекрывает в плане воздушную струю 4. В результате этого часть выпадающих из воздушно-водяной струи капель 6 (сечение Б—Б) при своем падении проходит мимо воздушной струи. Другая часть капель, попадая в воздушную струю 4 и проходя в ней путь по криволинейной траектории от верхней границы 7 до нижней 8, переносится на определенное расстояние от места попадания в воздушную струю 4. При этом дальность переноса осадков и выпадения по длине воздушной струи 4 в направлении к фронтальной границе 9 обрабатываемой зоны увеличится. Например, для вентиляторов типа НК-12КВ, ориентировочно, на 15—20%. Поворачивая

затем вентиляторы 1 и 2 в горизонтальной плоскости с одинаковой угловой скоростью, синхронно перемещают в карьерном пространстве между боковыми границами обрабатываемой зоны воздушно-водяные 3 и спутные им воздушные струи 4 сначала в одну, потом в другую сторону, т. е. циклически.

Для оценки эффективности описанного способа увеличения дальности переноса осадков в условиях карьера ПГХК предполагалось переместить вентилятор, расположенный на гор. +600 м, под вентилятор, расположенный на гор. +630 м, согласно схеме, представленной на рис. 5.22. Однако из-за малой (6—7 м) ширины бермы в намеченном месте было принято решение установить нижний вентилятор рядом с верхним, т. е. на гор. +630 м. Такое расположение вентиляторов также позволяло проверить возможность увеличения дальности переноса осадков спутными воздушно-водяной и воздушной струями. Для этого при проведении испытаний вентиляторы были сориентированы, примерно в одном направлении. При этом первый по ходу распространения спутных струй вентилятор создавал воздушно-водяную струю с положительным углом наклона, равным 4° , второй создавал воздушную струю с отрицательным углом наклона, равным 2° . Результаты эксперимента представлены на рис. 5.21 в виде графика 2 распределения осадков на различном удалении от вентиляторов. На этом же рисунке для сравнения приведен график 1 распределения осадков, полученный при работе только одного вентилятора в режиме генерирования осадков. Анализ графиков показывает, что в случае переноса осадков спутными воздушно-водяной и формируемой под ней воздушной струей максимум выпадения осадков перемещается по ходу распространения струй на 40—60 м. Интенсивность выпадения осадков на расстоянии 300—480 м от вентилятора в 2 раза выше, чем при переносе осадков одиночной струей. Увеличение дальности переноса осадков позволило нормализовать атмосферу в экскаваторном забое, удаленном на 420 м от вентилятора — генератора осадков, т. е. находящемся за пределами зоны эффективного действия одиночной воздушно-водяной струи.

На рис. 5.23 представлены графики изменений концентрации вредных примесей в экскаваторном забое, совмещенные с планами работы экскаватора и вентиляторов. Графики наглядно иллюстрируют, что в период работы вентиляторов в режиме генерирования искусственного снега концентрация окис-

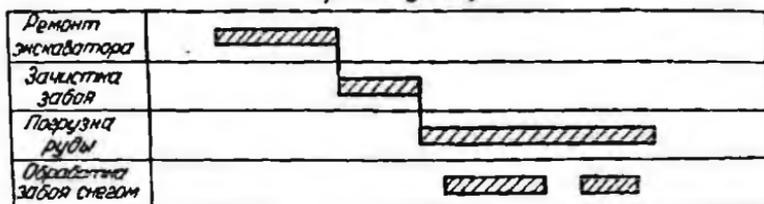
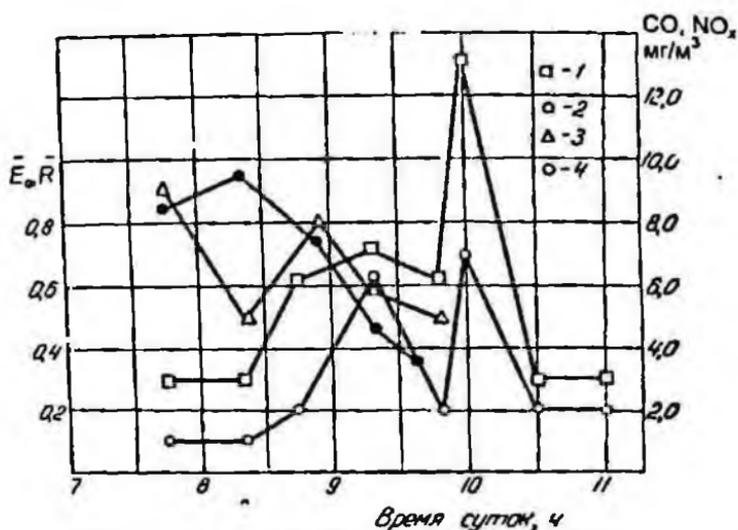
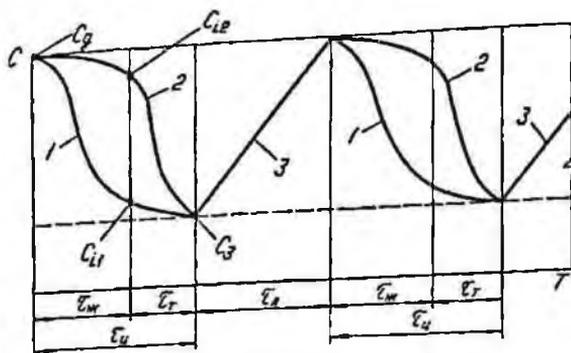


Рис. 5.23. Изменение концентрации вредных примесей в экскаваторном забое, находящемся в обрабатываемой снегом зоне карьера.
1 — окись углерода; 2 — окислы азота; 3 — спецгаз; 4 — скрытая энергия

лов азота в забое снижена в 2—3 раза, окиси углерода — в 1,5—2 раза, \bar{E}_a — в 2 раза, R — в 1,5 раза.

Для повышения эффективности нормализации атмосферы в карьерах на месторождениях радиоактивных полезных ископаемых предлагается новый способ пылегазоподавления [228]. Сущность способа заключается в последовательном нагнетании в атмосферу рабочей зоны карьера первоначально диспергированного жидкого связующего — воды, а затем — диспергированного твердого связующего, в качестве которого предлагается использовать полярные адсорбенты, например, цеолиты. При этом нагнетание связующих повторяют через интервалы времени, определяемые отношением объема атмосферы рабочей зоны карьера к количеству чистого воздуха, необходимого для нормализации атмосферы. На рис. 5.24 представлена графичес-

Рис. 5.24. График, поясняющий характер изменения концентрации вредных примесей в атмосфере карьера при обработке ее жидкими и твердыми связующими: 1 — крупные фракции пыли и гидрофильных ядовитых газов; 2 — радиоактивные инертные эманации и гидрофобные ядовитые газы при нагнетании в атмосферу карьера диспергированного жидкого связующего в течение времени τ_d и диспергированного твердого связующего в течение времени τ_r ; 3 — вредности в целом в течение времени τ_d . C_d — предельно допустимый уровень вредностей в атмосфере карьера; C_3 — заданный уровень остаточной концентрации вредностей; C_d, C_2 — текущие значения концентрации вредностей



кая интерпретация предлагаемого технического решения. Графики представляют собой динамические характеристики изменения во времени T уровня концентрации вредностей C в атмосфере рабочей зоны карьера. Предусмотренная последовательность операций нагнетания в атмосферу карьера первоначально жидкого связующего — воды ($\tau > \tau_k$), а затем твердого связующего — полярного адсорбента (τ_r) обусловлена взаимосвязью происходящих при пылегазоподавлении следующих физических процессов. Нагнетание в атмосферу диспергированного жидкого связующего — воды позволяет путем связывания и осаждения снизить за период $\tau_{ж}$ концентрацию гидрофильных (растворимых в воде) ядовитых газов (например, окислов азота) и крупных (размером более 10 мк) фракций пыли от допускаемого уровня C_d до значения C_1 , (график 1), т. е. примерно на 80 %. За этот же период $\tau > K$ концентрация радиоактивных инертных эманаций (например, радона), гидрофобных (нерастворимых в воде) ядовитых газов, а также мельчайших (размером менее 10 мк) силикозоопасных фракций пыли снизится от значения C_d до C_2 (график 2), т. е. примерно на 20 %. При нагнетании в атмосферу диспергированной воды, наряду с процессом эффективного вымывания из нее гидрофильных ядовитых газов и крупной пыли, воздух насыщается влагой. В результате этого сильно поляризованные молекулы водяного пара не только электризуют атмосферу и вместе с ней мельчайшие силикозоопасные фракции пыли, но и образуют с атомами инертных газов и другими гидрофобными ядовитыми газами тяжелые сильно поляризованные молекуляр-

вые комплексы. Последние, благодаря поляризации, обладают способностью эффективно связываться (сорбироваться) пористыми полярными адсорбентами. Таким образом, предшествующее нагнетанию в атмосферу карьера твердого связующего нагнетание диспергированной воды создает благоприятные условия для максимального взаимодействия с полярными адсорбентами оставшихся в атмосфере вредных ингредиентов, снижения их концентрации до заданного уровня C_3 . Из известных полярных адсорбентов наибольшей активной поверхностью пор, определяющей их адсорбционную способность, обладают цеолиты.

Последующее нагнетание в атмосферу карьера диспергированного твердого связующего — цеолита позволяет за период τ_7 обеспечить дальнейшее снижение концентрации гидрофильных газов и крупной пыли от значения C_{11} и других вредных ингредиентов от значения C_{12} до заданного уровня C_3 . В результате нагнетания в атмосферу карьера твердого связующего в течение периода τ_7 происходит снижение концентрации всех вредных ингредиентов до заданного уровня C_3 . Дальнейшее нагнетание твердого связующего даже в течение продолжительного времени приведет, как следует из графиков 1 и 2, лишь к незначительному снижению концентрации вредных ингредиентов, т. е. становится экономически нецелесообразным. Поэтому после снижения концентрации вредных ингредиентов в атмосфере до заданного уровня C_3 нагнетание твердого связующего прекращают. В этом случае при работающем горно-транспортном оборудовании и продолжительности штiria T , превышающей длительность периода нагнетания связующих τ_7 , в атмосфере карьера концентрация вредных ингредиентов начнет возрастать по прямолинейному закону (график 3) и через время τ_4 достигнет допустимого уровня C_d . Затем цикл нагнетания связующих повторяют.

Продолжительность периода τ_4 зависит от объема атмосферы рабочей зоны карьера и потребного для нормализации атмосферы количества свежего воздуха, которое в свою очередь зависит от суммарной интенсивности поступления в атмосферу карьера вредных примесей и определяется расчетным или экспериментальным путем.

Для практической реализации данного способа пылегазоподвления потребовалась разработка специального сопла, конструкция которого позволяла бы вводить в воздушную струю жидкое и твердое связующее [229]. На рис. 5.25 показана схема, а на рис. 5.26 — фото новой конструкции сопла, установленного на

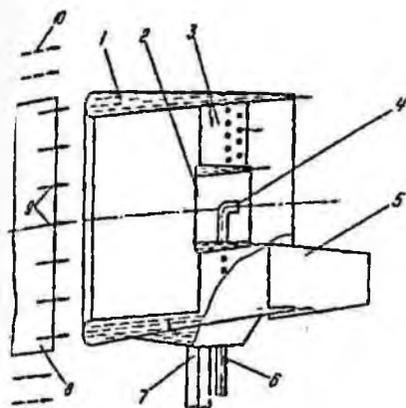


Рис. 5.25. Схема новой конструкции выносного водораспылительного сопла:

1, 2 — внешний и внутренний кольцевые коллекторы; 3 — полые радиальные ребра; 4 — форсунка для подачи в струю твердого связующего; 5 — направляющий желоб; 6, 7 — трубопроводы для подвода твердого и жидкого связующих; 8 — реактивное сопло двигателя; 9 — направление движения реактивных газов; 10 — направление движения воздушного потока от винта вентилятора

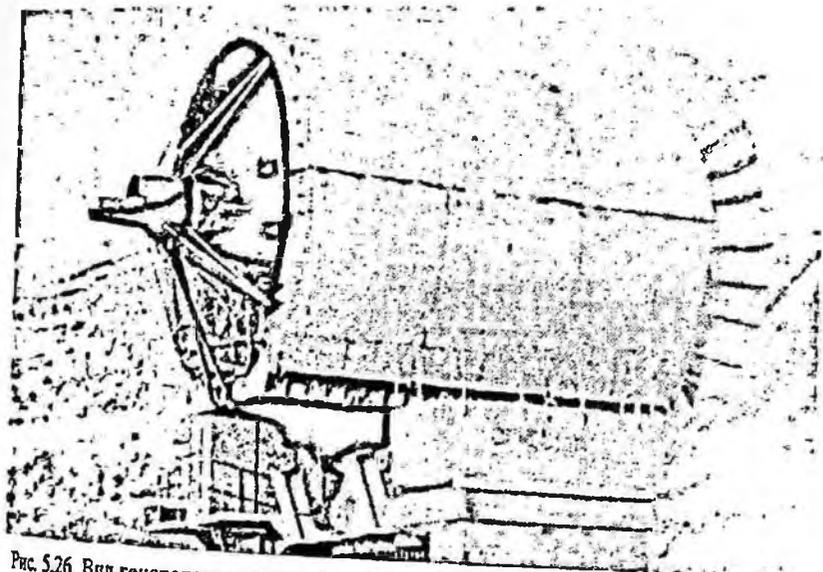


Рис. 5.26. Вид генератора осадков НК-12КВ-1М с соплом новой конструкции

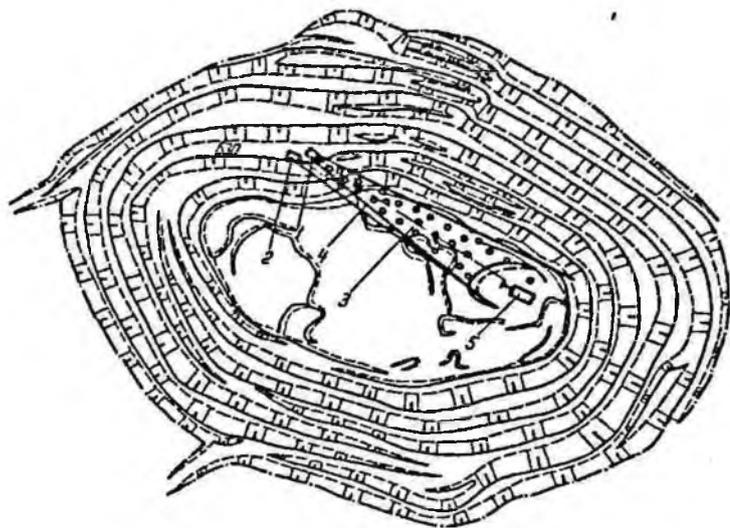


Рис. 5.27. Схема обработки осадками удаленных участков карьеров:
 1, 2 — вентиляторы НК-12КВ-1М, работающие, соответственно, в режиме генерирования осадков и в испытательном режиме; 3, 4 — воздушно-водяная и воздушные струи; 5 — экскаваторный забой

вентилятор НК-12КВ-1М. Рабочий проект данной конструкции сопла разработан в КБ ИГД МЧМ СССР. Сопло было изготовлено силами карьера и испытано в декабре 1987 г. Испытания показали, что сопло обеспечивает расход воды до $360 \text{ м}^3/\text{ч}$, т. е. на 20 % больше, чем сопло конструкции предприятия. Испытания сопла в качестве средства для введения в струю цеолита не были осуществлены из-за отсутствия последнего. Разработано три новых технических решения, направленных на повышение эффективности нормализации атмосферы с использованием искусственных осадков, два из которых опробованы в натуральных условиях с положительными результатами.

Система пылегазоподавления может использоваться для выполнения следующих операций по нормализации атмосферы в рабочей зоне карьера:

- создание дополнительного снежного покрова на взорванных блоках и в целом в рабочей зоне с целью снижения диффузной активности эманулирующих поверхностей и запыленности при движении автотранспорта по карьерным дорогам;

- обработка участков рабочей зоны карьера, в которых сосредоточено горно-транспортное оборудование, искусственными жидкими или твердыми осадками (рис. 5.27);

Таблица 5.2

Условия, необходимые для искусственного генерирования снежных осадков

Параметр	Значения параметра									
	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30
Температура воздуха в карьере, °С										
Температура воды в накопительном резервуаре, °С	2	6	10	14	18	33	26	30	34	38

— интенсификация воздухообмена в рабочей зоне карьера искусственными термиками.

При генерировании осадков двигатели вентиляторов НК-12КВ-1М должны работать на режиме, равном 0,85 номинального.

Место установки вентиляторов — северный борт карьера гор. +630 м — следует сохранить неизменным до конца отработки с учетом горно-геологических условий и перспектив развития рабочей зоны карьера.

Эксплуатацию системы в режиме генерирования твердых осадков снежной крупы следует производить при температуре воздуха не выше -12°C . Для обеспечения оптимальных условий процесса образования снега при температурах воздуха ниже -12°C температура воды в накопительном резервуаре не должна превышать значений, приведенных в табл. 5.2. В противном случае выпадающие из струи осадки будут представлять собой замерзающую морось, что может привести к образованию в карьере гололеда и обледенения горно-транспортного оборудования.

При создании дополнительного снежного покрова в карьере оптимальный расход воды, обеспечивающий максимальную дальность переноса и равномерность выпадения снега, должен составлять $270\text{--}280\text{ м}^3/\text{ч}$ на один вентилятор. В случае работы вентиляторов, при котором один из них создает воздушно-водяную струю, а другой — спутную ей воздушную струю, расход воды должен быть максимально возможным. Угол наклона воздушно-водяной струи должен быть положительным, равным $4\text{--}5^{\circ}$, угол наклона воздушной струи — отрицательным, также равным $4\text{--}5^{\circ}$. При формировании снежного покрова следует перемещать струю вентилятора в горизонтальной плоскости, фиксируя направление ее распространения на $2\text{--}3$ минуты через каждые $10\text{--}15^{\circ}$. Создание снежного покрова следует осуществлять в периоды максимальной относительной влажности атмосферы.

ного воздуха (повышенная облачность, утренние часы суток) при скорости ветра на поверхности, не превышающей 2 м/с.

При обработке застойных зон карьера с повышенной концентрацией вредных примесей в атмосфере, расположенных на расстоянии до 200 м в плане от вентиляторов, расход должен быть максимальным; соответствовать оптимальному (270—280 м³/ч) — при расстояниях от 200 до 350 м. Для обработки более удаленных зон необходимо применять схему со спутными воздушно-водяной и воздушной струями при максимальном расходе воды. Обработку следует производить циклически, при этом продолжительность периода генерирования снега должна составлять 20—30 минут с интервалами времени между периодами генерирования, равными 30—40 минутам. В течение последних двигатели вентиляторов должны работать на режиме малого газа и должен обеспечиваться минимальный расход воды с целью исключения ее замерзания в подводящем водопроводе. Направление и угол перемещения воздушно-водяной струи в горизонтальной плоскости при обработке зоны должны определяться в каждом конкретном случае, исходя из места расположения застойной зоны относительно генератора осадков и ее размеров в плане.

Для интенсификации воздухообмена в рабочей зоне карьера искусственными термиками температура подаваемой в воздушную струю воды, обеспечивающая полное испарение воды в атмосфере, должна быть не ниже +50 °С, при этом расход воды должен составлять 150—180 м³/ч. Угол наклона струи должен быть максимальным, т. е. равным -15°. Продолжительность нагнетания в атмосферу карьера нагретой воды при фиксированном положении струи должна быть не менее 20 мин. Формирование термиком может осуществляться циклически.

Опыт создания и промышленной эксплуатации систем пылегазоподавления в карьерах Целинного и Приаргунского горнохимических комбинатов может быть использован в любом карьере для решения проблемы оздоровления условий труда и уменьшения величины ущерба за счет сокращения объемов выбросов вредных примесей в окружающую среду при работе технологического комплекса и производстве массовых взрывов, являющихся одной из основных причин ухудшения экологической обстановки в районах горнодобывающих комплексов. Вопросу снижения вредного воздействия на окружающую среду массовых взрывов ВВ в карьерах посвящена следующая глава.

ГЛАВА 6

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ, РАССЕЯНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ МАССОВОМ ВЗРЫВЕ В КАРЬЕРЕ

6.1. Феноменологическая модель процесса формирования пылегазового облака

Основными интегральными параметрами, характеризующими взорванную горную массу и образующуюся при взрывах пыль, являются коэффициент разрыхления, средняя крупность кусков, средний диаметр пылинок и объем взрываемого блока. Для описания функциональной зависимости количества пыли, попадающей в ПГО, от этих параметров предложена феноменологическая модель процесса пылеобразования при производстве массовых взрывов в карьерах. Интегральные параметры являются эмпирически определяемыми величинами и варьируются в рамках модели [230].

Коэффициенты пропорциональности, входящие в предлагаемые расчетные формулы, являются переменными для конкретных условий и подлежат экспериментальному определению.

Для развития и уточнения модели пылеобразования при массовых взрывах целесообразно установить зависимости интегральных параметров от технологических и горно-геологических факторов взрывания.

На основании допущения о пространственной однородности и масштабной инвариантности взорванного блока полный объем пыли определяется по формуле

$$V_n = V_{\text{гл}}^0 \omega_{\text{обр}} = \xi \frac{\bar{d}_n}{D_k} V_{\text{гл}}^0, \quad (6.1)$$

где $V_{\text{гл}}^0$ — объем взрываемого блока, м^3 ;

$\omega_{\text{обр}}$ — вероятность образования пыли;

ξ — безразмерный коэффициент, зависящий от структуры и других механических свойств пород (в первом приближении $\xi = 1,0$);

\bar{d}_n — средний размер пылинок, м ;

D_k — средний характерный размер, или крупность куска во взорванном блоке, м .

Из формулы (6.1) следует, что чем меньше средний размер куска (\bar{D}_k) во взорванной горной массе, тем больше образуется пыли. Это обусловлено увеличением количества образующихся при взрыве радиальных трещин и ростом объема местных разрушений горной породы. При расчетах следует учитывать, что в ПГО попадает лишь часть образующейся пыли, так как взорванная горная масса является своеобразным задерживающим и фильтрующим слоем. С практической точки зрения с достаточной точностью пропускная эффективность этого "фильтра" может быть определена по формуле

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{\Delta V}{V_1} = \frac{(k-1)V_{\text{гн}}^0}{kV_{\text{гн}}^0} = \left(1 - \frac{1}{k}\right), \quad (6.2)$$

где ΔV — изменение объема взорванного блока, м³;

V — объем взорванной горной массы, м³;

k — коэффициент разрыхления, определяемый экспериментально.

Из формулы (6.2) следует, что в пределе больших $k\omega_{\text{пр}} \rightarrow 1$, в другом предельном случае невзорванного блока $k = 1$ $\omega_{\text{пр}} = 0$.

Без учета вторичного взметывания объем пыли, проникающей в ПГО, равен

$$(V_{\text{п}})_{\text{ПГО}}^{(1)} = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \xi \frac{\bar{d}_{\text{п}}}{D_{\text{к}}} \cdot V_{\text{гн}}^0. \quad (6.3)$$

Для определения объема пыли, выделяющейся в процессе вторичного выброса — с момента развала купола взорванной горной массы — до выравнивания до $P_{\text{шт}}$, необходимо учесть объем пыли, остающейся в горной массе.

$$(V_{\text{п}})_{\text{гн}} = \frac{1}{k} V_{\text{гн}}^0 \frac{\bar{d}_{\text{п}}}{D_{\text{к}}}. \quad (6.4)$$

С учетом вероятности проникновения пыли в выброс находим

$$(V_{\text{п}})_{\text{ПГО}}^{(2)} = \frac{k-1}{k^2} \xi \frac{\bar{d}_{\text{п}}}{D_{\text{к}}} V_{\text{гн}}^0. \quad (6.5)$$

Таким образом, суммарный объем пыли, выброшенной в ПГО, составляет

$$(V_n)_{\text{ПГО}}^{\Sigma} = (V_n)_{\text{ПГО}}^{(1)} + (V_n)_{\text{ПГО}}^{(2)} = \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) \xi \frac{\bar{d}_n}{D_k} V_{\text{об}}^0. \quad (6.6)$$

Для определения массы пыли в ПГО достаточно умножить объем пыли на среднюю плотность взрывааемых горных пород $\bar{\rho}_{\text{гп}}$:

$$(M_n)_{\text{ПГО}} = \bar{\rho}_{\text{гп}} \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) \xi \frac{\bar{d}_n}{D_k} V_{\text{об}}^0. \quad (6.7)$$

Из формулы (6.7) следует, что чем меньше коэффициент разрыхления k , тем меньше масса пыли в ПГО, и наоборот. Таким образом, любые мероприятия, снижающие k , будут способствовать сокращению массы пыли в облаке. Однако следует учесть, что k и D_k — связанные между собой величины, так же, как и средний диаметр образующихся пылинков.

Из анализа экспериментальных данных и общих физических соображений следует, что коэффициент разрыхления имеет максимум при некотором значении средней крупности куска $D_k = D_m$ (рис. 6.1). При очень больших и очень малых D_k $k \rightarrow 1$. Аналитическая реконструкция этой графической зависимости на основе общих соображений трехмерной изотропной теории размерностей позволяет описать ее однопараметрической функцией

$$k(D_k) = \left\{ 1 + \left[\frac{D_0}{D_k} \ln \left(1 + \frac{D_k^2}{D_0^2} \right) \right]^3 \right\}. \quad (6.8)$$

В предельном случае, при очень мелкой крупности, зависимость $k = f(D_k)$ описывается, согласно (6.8), формулой

$$k(D_k) = 1 + \left(\frac{D_k}{D_0} \right)^3. \quad (6.9)$$

В другом предельном случае, при очень большой крупности ($D_k \gg D_0, D_m$) имеем

$$k(D_k) \cong 1 + 8 \left(\frac{D_0}{D_k} \ln \frac{D_k}{D_0} \right)^3. \quad (6.10)$$

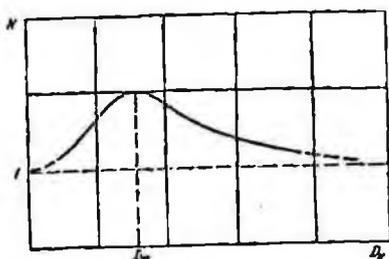


Рис. 6.1. Зависимость коэффициента разрыхления взорванного блока от крупности куска горной породы

Таким образом, соотношение (6.8) действительно имеет максимум и описывает асимптотическое поведение графической зависимости (рис. 6.1).

Следует отметить, что D_0 — параметр модели, имеющий размерность длины, определяемой экспериментально в каждом конкретном случае. Значения этого параметра зависят как от горно-геологических свойств породы (например, крепости), так и от технологии взрывания. Следовательно, если известна D_k взорванного блока и из экспериментов определено значение D_0 , то на основе (6.8) определяется k . При этом следует учитывать, что обратная зависимость $D_k = D(k)$ является двухзначной функцией k — имеет две ветви с точкой ветвления $D_k = D(k)$ в точке максимума прямой зависимости $k = f(D_k)$ $D_k(k_m) = D_m$.

С учетом (6.8) вместо (6.7) имеем

$$(M_n)_{\text{пго}} = \bar{\rho}_{\text{гп}} \left[k^{-2} D_k \xi V_{\text{гп}}^0 \cdot \frac{\bar{d}_n}{D_k} \right]. \quad (6.11)$$

В предельных случаях, соответствующих формулам (6.9) и (6.10), вместо (6.11) получаем

$$(\bar{M}_n)_{\text{пго}} \equiv \xi \bar{\rho}_{\text{гп}} V_{\text{гп}}^0 \frac{\bar{d}_n}{D_k} \begin{cases} 2 \left(\frac{D_k}{D_0} \right)^3, & D_k \ll D_0 \\ 16 \left(\frac{D_0}{D_k} \ln \frac{D_k}{D_0} \right)^3, & D_k \gg D_0, D_n. \end{cases} \quad (6.12)$$

Следовательно, в пределе очень сильного измельчения породы взрывом (превращения почти всей породы в пыль) $\bar{d}_n = D_k$, масса пыли в ПГО прямо пропорциональна кубу средней крупности кусков породы (пылинок), т. е. в этом пределе модель дает полное согласие с «элементарными» общими соображениями.

В случае большой крупности взорванной породы масса пыли в ПГО описывается сложной логарифмически-степенной зависимостью. Упрощая, можно сказать, что эта степенная зависи-

мость обратно пропорционального типа от D_k , показатель степени которой больше 1, но меньше 4.

Приведем некоторые численные оценки по полученным формулам с использованием данных по массовым взрывам на карьере Забайкальского ГОКа.

$$\text{Примем } V_{\text{об}}^0 = 100 \cdot 20 \cdot 12 = 2,4 \cdot 10^4 \text{ м}^3,$$

$$k = 1,3; D_k = (10^{-2} \div 10^{-1}) \text{ м},$$

$$\bar{d}_n = (10^{-4} \div 10^{-5}) \text{ м},$$

$$\bar{\rho}_{\text{гн}} = (2 \div 3) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

$$\xi = 1,0.$$

Тогда, согласно (6.7), находим

$$(M_n)_{\text{ПГО}} = (0,2 \div 0,3)(10^3 \div 10^4) \text{ кг}.$$

Удельное количество пыли составит

$$(C_n)_{\text{ПГО}} = \frac{(M_n)_{\text{ПГО}}}{V_{\text{об}}^0} = (0,8 \div 1,2) \cdot (10^{-2} \div 10^{-1}) = \\ = (0,08 \div 0,12) \text{ кг/м}^3.$$

Эти значения совпадают по порядку величин с экспериментальными данными П. В. Бересневича $(0,027 \div 0,17) \text{ кг/м}^3$ [231].

При использовании тех же модельных представлений установлено, что зависимость средней крупности куска (\bar{D}_k) от удельного заряда ВВ на блоке описывается формулой

$$\bar{D}_k = \bar{d}_{n0}(q_0/q)^n, \quad (6.13)$$

где q_0 — удельный заряд ВВ, при котором вся горная масса превращается в пыль, средний диаметр которой равен \bar{d}_{n0} , кг/м^3 ;

q — фактический заряд ВВ, кг/м^3 ;

n — показатель степени, зависящий от механических свойств породы. На основании анализа экспериментальных данных $n = 1/2$.

6.2. Термодинамическая модель процесса формирования ПГО

Взрывчатые вещества являются органическими соединениями и содержат в своем составе углерод, водород, кислород и азот. В результате взрыва образуются окислы углерода, вода, окислы азота и другие продукты в соотношении, определяемом

как составом ВВ, так и термодинамикой взрыва. Взрывчатое превращение — процесс необратимый. Крайне быстрое течение реакций взрыва происходит в направлении, определяемом условиями термодинамического равновесия. Продукты взрыва реагируют между собой в соответствии с температурой и давлением в области взрыва. Поэтому к реакциям в продуктах взрыва применимы законы, относящиеся к обратимым термодинамическим процессам, в частности закон химического равновесия и принцип Ле Шателье [232].

Полная внутренняя энергия, образующаяся при взрыве газов, являющаяся функцией термодинамического состояния системы, равна

$$E = M_2 C_r^v \cdot T_0, \quad (6.14)$$

где M_2 — масса ВВ, кг;

C_r^v — удельная теплоемкость газов при постоянном объеме, Дж/кг·К;

T_0 — температура цепной реакции ВВ, К.

Известно, что в процессе охлаждения газов в результате совершаемой ими в горном массиве работы и теплообмена состояние химического равновесия системы является подвижным до определенного предела. При температуре немного меньшей температуры взрыва происходит “закалка” равновесия и при дальнейшем охлаждении газов их химический состав остается неизменным. Следует отметить, что величины C_r^v , T_0 и химический состав газов после “закалки” непосредственно связаны между собой.

Энергия взрыва лишь частично используется на дробление горной массы и связанный с ним процесс пылеобразования. Остальная энергия расходуется на сопутствующие дроблению процессы и представляет собой потери. Так, например, определенная доля энергии ВВ идет на создание сейсмических и звуковых волн, теплообмен с горной породой. Наконец, энергия расходуется на совершение работы расширяющимися взрывными газами в отношении разрушающейся породы и окружающей среды, т. е. на подъем и вспучивание горной массы, разлет осколков и вытеснение окружающей воздушной среды. В конце этих процессов давление газов достигает атмосферного и этап формирования пылегазового облака завершается. Дальнейший этап развития и рассеивания ПГО связан с атмосферными эффектами динамического вовлечения и турбулентного перемешивания [233].

Таким образом, используя первое начало термодинамики, в момент завершения термодинамического этапа имеем

$$\int_0^T dQ = \int_0^I dE + \int_0^I PdV + A_{sw} + A_R, \quad (6.15)$$

где dQ — элемент тепла, переданного газам окружающей среде и породе;

dE — дифференциальный элемент изменения внутренней энергии газов;

P, V — давление и объем взрывных газов;

A_{sw} — доля энергии ВВ, идущая на создание сейсмических и звуковых ударных волн;

A_R — энергия взрыва, расходуемая на дробление горной породы и пылеобразование.

В соотношении (6.15) предполагается, что все процессы протекают одновременно, а также пренебрегается энергетическими потерями, связанными с истечением части газов в атмосферу. Это оправдывается требуемой для практики точностью расчетов. Кроме того, следует помнить, что процесс взрыва является сугубо неравновесным и необратимым. Действительно, до момента выравнивания давления газа до атмосферного рассматриваемая термодинамическая система (взрывные газы — окружающая среда) находится под воздействием детонационных ударных волн большой и малой интенсивности. Эти волны описываются уравнениями ударных адиабат Гюгонно, которые принципиально отличаются от равновесных адиабат Пуассона и политроп. Неравновесные термодинамические процессы ведут к возрастанию энтропии, в то время как для равновесных процессов энтропия постоянна. Поэтому показатели ударных адиабат больше показателей адиабат Пуассона. Иначе говоря, неравновесный процесс ближе к изохорическому, а ударные адиабаты идут круче равновесных. Несмотря на указанную принципиальную особенность неравновесного процесса, формально работу расширения взрывных газов можно определить по соотношениям, применяемым для равновесных политропных процессов. Поэтому выражение (6.15) примет вид

$$M_2 C_V (T_0 - T_n)(1 - \lambda) = M_2 R (T_0 - T_n) / (n - 1), \quad (6.16)$$

где T_n — температура газов в момент достижения ими атмосферного давления, К;

R — газовая постоянная, Дж/кг·К;

λ — доля энергии взрыва, затраченная на дробление породы.

Учитывая, что

$$C' = R/(\kappa - 1), \quad (6.17)$$

величина λ рассчитывается по формуле ($n > \kappa$)

$$\lambda = (n - \kappa)/(n - 1), \quad (6.18)$$

где κ — показатель равновесной адиабаты взрывных газов.

Соотношение (6.18) показывает, что чем больше n , т. е. чем ближе процесс расширения к изохорическому, тем ближе величина λ к единице.

В рамках рассматриваемого подхода имеет место соотношение

$$T_n = T_0 \exp\{-(n - 1)/n \cdot \ln(H)\}, \quad (6.19)$$

где $H = (\rho_1 R T_0)/P_{\text{атм}}$;

H — давление взрывных газов в момент “закалки”;

ρ_1 — плотность ВВ, кг/м³.

Таким образом, соотношения (6.16)—(6.19), полученные на основе I начала термодинамики, показывают, что задача расчета основных термодинамических параметров ПГО T_n , V_n сводится к определению показателя политропы рассматриваемого неравновесного процесса расширения взрывных газов после детонации и “закалки”.

Наиболее естественным и корректным подходом к решению этой проблемы является подход, основанный на фундаментальных принципах термодинамики. Известно, что все природные процессы протекают в направлении увеличения энтропии. При рассмотрении взрыва и последующего неравновесного перехода системы газы — окружающая среда в состоянии равновесия определяющим является принцип максимального возрастания энтропии системы (II начало термодинамики), так как он оказывает решающее влияние на все характеристики переходного процесса. Следовательно, проблема сводится к разработке подхода, основанного на модельном расчете изменения энтропии системы и определения ее максимума в зависимости от значений общих параметров процесса [234].

Будем рассматривать первую часть системы взрывные газы — окружающая среда в рамках модели идеального газа и,

следовательно, пренебрегать зависимостью теплоемкости смеси газов от температуры. Тогда изменение энтропии газов в результате политропного процесса равно

$$\Delta S_r = \int_0^T \frac{dQ}{T} = \int_{T_0}^{T_1} (dE + PdV)/T. \quad (6.20)$$

Используя соотношения (6.19)—(6.20), находим

$$\Delta S_r = -M_s R / (\kappa - 1) \cdot (n - \kappa) / n \cdot \ln(H). \quad (6.21)$$

Так как для неравновесных процессов $n > \kappa$, то $\Delta S < 0$.

Таким образом, энтропия взрывных газов в процессе их неравновесного политропного расширения и охлаждения уменьшается.

Рассмотрим теперь как изменяется энтропия окружающей среды в результате неравновесного перехода системы после взрыва в состояние равновесия. Обмен теплом между взрывными газами и средой в процессе их расширения зависит от температуры. При высоких температурах давление и перепад температур составляют огромные величины, и тепловая энергия газов, интенсивно поглощаемая средой, идет на совершение работы над средой: дробление, сейсмические колебания, ударную и воздушную волну и т. д. При низких температурах газов способность среды поглощать от них тепло и энергию уменьшается, т. е. процесс расширения и охлаждения газов становится все более адиабатичным и равновесным.

Таким образом, при взрыве мы имеем дело с псевдополитропным процессом, так как показатель политропы процесса зависит от температуры газов. Однако этот сложный процесс можно аппроксимировать неравновесным квазиполитропным процессом, для которого вводится понятие постоянного показателя процесса n . На основании вышеизложенного дифференциальный элемент тепла, полученного окружающей средой от взрывных газов, можно записать в виде

$$dQ' = -\alpha(T - T')dT, \quad (6.22)$$

где T' — температура окружающей среды, К;

α — коэффициент “теплопередачи” процесса, Дж/кг.

Выражение (6.22) подразумевает линейную по температурному градиенту аппроксимацию неравновесного процесса полу-

чения тепла окружающей средой. Мерой неравновесности процесса является отношение

$$\gamma = (T - T^*)/T_0. \quad (6.23)$$

Если $\gamma \ll 1$, то процесс перехода системы к состоянию равновесия является квазистатическим или равновесным. При $\gamma < 1$ процесс достижения системой равновесного состояния протекает очень интенсивно и является сугубо неравновесным. Система быстро и необратимо переходит через ряд состояний, характеризующихся сложными нестационарными полями температур. Рассматриваемое явление взрыва и последующего перехода системы взрывные газы — окружающая среда в состояние равновесия относится к необратимым неравновесным и быстро текущим процессам. Поэтому $\gamma = (T - T^*)/T_0$; $T_0 \geq T^* \geq T_n$, где T^* — температурная константа, являющаяся параметром процесса и зависящая от термодинамических и механических свойств среды и ВВ.

Таким образом, мы получим уравнение, описывающее изменение температуры T в процессе перехода системы к состоянию равновесия.

$$(T - T^*)/T = (T - T^*)/T_0. \quad (6.24)$$

Кроме того, согласно (2.16), (2.17), (2.22), имеем

$$\Delta Q' = \int_0^1 \alpha Q' = \lambda M_3 R / (\eta - 1) \cdot (T_0 - T_n). \quad (6.25)$$

Используя выражение (6.25), получим

$$\begin{aligned} \alpha/3T_0 \cdot (T_0 - T_n) \{ (T_0^2 + T_n \cdot T_0 + T_n^2) - 1,5T^*(T_0 - T_n) \} = \\ = \lambda M_3 R / (H - 1) \cdot (T_0 - T_n). \end{aligned} \quad (6.26)$$

По определению изменения энтропии окружающей среды при переходе взрывных газов в состояние равновесия описывается выражениями

$$\begin{cases} (dS)_{SR} = dE'/T, \\ (\Delta S)_{SR} = \int_0^1 (dS)_{SR}. \end{cases} \quad (6.27)$$

Используя соотношения (6.19), (6.24)—(6.27), находим

$$(\Delta S)_{SR} = M_3 R / (H - 1) \cdot (n - H) / (n - 1) \cdot 3T_0 \{ T_0 (\ln(T_0 + T^* - T_n) / T_n - (T_0 - T_n)) \} : \{ (T_0^2 + T_n T_0 + T_n^2) - 1,5T^*(T_0 - T_n) \}. \quad (6.28)$$

Учитывая (6.21) для изменения энтропии взрывных газов и соотношение (6.19) и (6.20), находим выражение энтропии всей системы взрывные газы — окружающая среда.

$$\begin{aligned} \Delta S_{\Sigma} = (\Delta S)_{SR} + (\Delta S)_r = & -3M_3 R / (H - 1)(n - H) / (n - 1) \cdot \\ & \cdot \{ A \ln[1 + A \cdot (1 - \exp(b))] - (1 - \exp(b)) / [A - (1 + \exp(b))] \cdot \\ & \cdot (1,5 - a \exp(b))] - (n - 1) / (3n) \ln(H) \}, \end{aligned} \quad (6.29)$$

где $A = T_0 / T^*$;

$$b = -(n - 1) / n \cdot \ln(H).$$

Как указывалось выше, переход системы взрывные газы — окружающая среда в конечное равновесное состояние после взрыва протекает таким образом, что энтропия системы изменится согласно принципу максимального возрастания. Параметрами процесса являются \aleph , H , M , и R . Незвестными, подлежащими определению, являются показатель политропы n и отношение температур A .

При определении $\Delta S_{\Sigma \max}$ следует учесть систему неравенств

$$\begin{cases} T_n \geq T_w; \\ T_0 \geq T^* \geq T_n. \end{cases} \quad (6.30)$$

Используя соотношение (6.19), вместо (6.30), имеем $1 \leq A \leq \exp(-b) \leq T_0 / T_w$, где T^* — температурная константа, К; T_w — температура окружающей среды, К.

После вычисления n_m , соответствующего ΔS_{Σ} , нетрудно определить объем образовавшихся газов (V_r) в момент достижения ими атмосферного давления и T_n по следующим формулам:

$$V_r = \frac{M_3}{\rho_3} \cdot \exp(\ln H) / n_m, \quad (6.31)$$

$$T_n = T_0 \cdot \exp \left[\frac{(1 - n_m) \ln H}{n_m} \right]. \quad (6.32)$$

Объем ПГО в этот момент определяется следующим образом:

$$V_n = V_T - V_{\text{га}}^n (k - 1), \quad (6.33)$$

где $V_{\text{га}}^n$ — объем взрываеваемого блока, м³;

k — коэффициент разрыхления горной породы.

Таким образом, если известны исходные параметры взрывного процесса (\aleph , H , M , R , T_0 , T_w , ρ , $V_{\text{га}}^n$), можно определить коэффициенты η_m и A , соответствующие максимальному изменению энтропии системы, а затем найти температуру и объем ПГО в момент достижения газом атмосферного давления.

6.3. Математическая модель процесса подъема и рассеяния ПГО

После выравнивания давления взрывных газов до атмосферного начинается динамический этап развития ПГО — подъем и рассеивание. Процессы на этом этапе обусловлены эффектами вовлечения и турбулентного перемешивания. Уравнения, описывающие изменения основных параметров ПГО в процессе подъема, могут быть получены на основе уравнений механики тел с переменной массой (уравнения Мещерского) и I начала термодинамики с учетом эффекта смещения. Рассматривая всплывающее облако в рамках одномерной модели как часть турбулизованного объема и следуя [233], получим систему уравнений

$$\begin{cases} dW_i^2/dz + 2\alpha(Z)W_i^2 = 2g \left[(T_i - T_w(z))/T_w(z) \right], \\ 3R_i dR_i/dz = T_i(z)/T_i \cdot \alpha(z) + \Gamma/(\aleph \cdot T_w(z)), \\ dT_i/dz = -\gamma_a T_i/T_w(z) - \alpha(z)[T_i - T_w(z)], \end{cases} \quad (6.34)$$

где $W_i(z)$ — скорость подъема ПГО на высоте z , м/с;

$T_i(z)$ — средняя температура ПГО на высоте z , К;

$R_i(z)$ — радиус ПГО на высоте z , м;

$\gamma_a = 0,01$ К/м — сухоадиабатический градиент температуры в атмосфере;

$\Gamma = 3,4 \cdot 10^{-2}$ — автоконвективный градиент атмосферы, К/м;

\aleph — показатель адиабаты атмосферного воздуха;

T_w — температура атмосферы на высоте z , К;

$\alpha(z)$ — коэффициент вовлечения окружающего воздуха в ПГО при его подъеме, м^{-1} .

Коэффициент вовлечения $\alpha(z)$ в рамках одномерной модели определяется следующим образом: $\alpha(z) = 1/M_1 \cdot dM_1/dz$, где $M_1(z)$ — масса исследуемого движущегося объема, ограниченного го пронцаемой поверхностью заданного типа, кг.

Исходя из соображений теории размерностей, известных представлений о процессах тепло(массо)обмена через неустойчивую пронцаемую поверхность, в наиболее общем случае имеем $\alpha(z) = 1/R_1(z) \cdot T_1(z)/T_w(z) \cdot V_1/W_1 \cdot C$, где V_1 — осредненная по поверхности скорость втекания (вытекания) в этот объем окружающей среды, м/с; C — безразмерный коэффициент, который определяется на основании экспериментальных данных.

Экспериментально установлено, что в случае развитого турбулентного обмена между окружающей средой и рассматриваемым движущимся объемом, когда число Рейнольдса ($Re = W_1 R_1$) много больше некоторого критического значения и в случае отсутствия интенсивного сносящего потока в среде $V_1/W_1 \cong \text{const}$. В данной работе используется модель, разработанная в [233].

$\alpha(z) = 3(z^* + z)$, где $z^* = 5R_{10} = 5(3V_{11}/4\pi)1/3$; R_{10} — эффективный начальный радиус ПГО при $z = 0$, м. Наблюдения в атмосфере и в лабораторных условиях показывают, что радиусы неадиабатических поднимающихся терпиков (ПГО) линейно растут с высотой.

$$R_1(z) = R_{10} + 0,2z. \quad (6.35)$$

Следует учесть, что характерной особенностью атмосферы является вертикальная неоднородность ее характеристик. Зависимость температуры приземного слоя атмосферы от высоты приближенно описывается следующим образом:

$$T(z) = T^0 + a \cdot z + bz^2, \quad (6.36)$$

где T^0 — температура атмосферы вблизи земной поверхности;

a — градиент температуры, К/м;

$b = 0,5 \frac{d^2 T}{dz^2}|_{z=0}$.

Если $a > 0$, то имеет место инверсионная стратификация, при $a < 0$ — неустойчивое или безразличное состояние атмосферы.

Подъем ПГО происходит с замедлением и на высоте z_k облако останавливается, т. е. $W_1(z_k) = 0$. Это означает, что на высоте

конвекции z_t , когда подъем ПГО завершен, радиус ПГО может быть определен по формуле (6.35). После остановки начинается процесс рассеяния (диффузии) ПГО. При наличии фонового ветра ($V_\phi \neq 0$) облако будет дополнительно смещаться по направлению ветра. Таким образом, расчет динамики ПГО сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} dW_i^2/dz + 2\alpha(Z)W_i^2 = 2g[(T_i - T_w(z))/T_w(z)], \\ T_i/dz = -\gamma_0 T_i/T_w(z) - \alpha(z)[T_i - T_w(z)], \\ R_i(z) = R_{i0} + 0,2z. \end{cases} \quad (6.37)$$

В рамках принятой модели ПГО рассматривается на уровне конвекции как сферически симметричный источник примеси, что дает возможность использовать формулу для определения концентрации примеси от мгновенного изотропного точечного источника [235].

$$C(r, \tau) = Q_{пр}/(4\pi D\tau)^{3/2} \exp(-R^2/(AD\tau)), \quad (6.38)$$

где D — коэффициент диффузии примеси, $\text{м}^2/\text{с}$;

$Q_{пр}$ — масса примеси, кг ;

τ — время, прошедшее после взрыва, с ;

R — радиус-вектор в полярной системе координат, начало которого помещается в центр ПГО на уровне z_t , м .

Коэффициент диффузии в рамках рассматриваемой модели может быть определен из следующего соотношения:

$$D = R_{ik}^2/(6\tau_k), \quad (6.39)$$

где τ_k — время подъема облака на уровень конвекции;

R_{ik} — радиус ПГО в момент τ_k , м .

Формула (6.38) получена в рамках следующего предположения. Видимая граничная поверхность ПГО на уровне конвекции совпадает с одной из концентрационных поверхностей облака. В нашем случае сферической симметрии изоконцентрационная поверхность является сферой. Считаем, что радиус этой сферы имеет максимальную величину на уровне z_t . Радиус изоповерхности с данной концентрацией примеси после остановки облака начинает убывать вследствие диффузии примеси из объема, ограниченного этой поверхностью. Эволюцию границы зоны сверх-

нормативного загрязнения наземной поверхности, внутри которой концентрация примеси превышает норму c_0 , можно определить при $\tau > \tau_k$ по соотношению [235]

$$\rho = \left\{ 0,667 R_{ik}^2 \tau_k \cdot \ln \left[Q_{\text{нр}} \left(\frac{2\pi\tau}{3\tau_k} \right)^{2/3} R_{ik}^3 c_0 \right] - [z_k - H(x, y)]^2 \right\}^{1/2} \quad (6.40)$$

В случае, если окружающая наземная поверхность является плоской, $H(x, y) = H_k = \text{const}$, где H_k — глубина карьера, м.

В этом случае зона сверхнормативного загрязнения в каждый момент времени является кругом, радиус которого сначала возрастает от нуля до максимального значения, а затем убывает до нуля. Учет фоновых ветров ведет к линейному смещению центров этих кругов. Если нельзя пренебречь неоднородностями окружающего рельефа, то в первом приближении можно пренебречь неоднородностями поверхности в направлении поперечном направлению ветра (ось X). Тогда

$$H(x, y) = H(x) = H(U_{\text{ф}} * \tau) = H_k \pm h(x), \quad (6.41)$$

где $h(x)$ — высота местности относительно борта карьера.

Начало системы координат помещено в место взрыва.

Величина санитарной нормы при разовых загрязнениях для населенных пунктов определяется ПДК. При этом время загрязнения не должно превышать получаса. Исходя из этого, можно определить длину шлейфа (лепестка) загрязнения наземной поверхности, который образуется в процессе смещения зоны сверхнормативного загрязнения по направлению ветра. Эта величина зависит не только от мощности взрыва, типа ВВ, свойств горной породы и технологии взрывания, но и от состояния атмосферы и орографии окружающей местности. При наиболее неблагоприятных условиях (сильная температурная инверсия и штиль) длина лепестка будет максимальной L_0 .

При расчете ЗВЗ учитывается восьмирумбовая роза ветров. Длину ЗВЗ в направлении каждого румба определяют по следующему соотношению:

$$\begin{aligned} l_i &= L_0 \cdot P_i / P_0 \text{ при } P_i > P_0; \\ l_i &= L_0 \text{ при } P_i < P_0. \end{aligned} \quad (6.42)$$

P_0 — повторяемость ветра одного румба при круговой розе ветров ($P_0 \approx 12,5\%$);

L_0 — длина лепестка в направлении румба.

6.4. Численная модель и программа расчета зон возможного загрязнения окружающей среды при массовых взрывах

Математическая модель процесса формирования ПГО представлена в виде (6.29), (6.32), (6.33) с учетом условий (6.30), (6.31). Математическая модель процесса подъема и распада ПГО может быть записана в виде (6.37). Величины z_k , T_k , R_k рассчитывались при условии, что скорость подъема облака на уровне z_k $W(z_k) \leq 0,1$ м/с. Температура $T(z)$ атмосферы рассчитывалась по формуле (6.36) при $b = 0$. Радиусы изоповерхностей с концентрацией c_0 рассчитывались по формуле (6.40). Блок-схема алгоритма расчета ЗВЗ приведена на рис. 6.2.

Входными параметрами для расчетов являются: x , T_0 , ρ_0 — плотность ВВ, кг/м³, q , k — коэффициент разрыхления взорванной горной массы, M_0 , R , $T_{кв}$, a , $Q_{пр}$, c_0 , U_ϕ , $H_{кв}$.

Радиусы изоповерхности с концентрацией $c = c_0$ рассчитывались по формуле (6.40). Анализ выражения (6.40) показал, что зависимость имеет максимум и убывает при дальнейшем увеличении τ . При $\tau = \tau_0$ величина $\rho(\tau_0) = 0$. Величина τ_0 показывает время, в течение которого происходит загрязнение земной поверхности.

На рис. 6.3 приведена зависимость, рассчитанная при $M_0 = 400000$ кг и массе примеси (мелкодисперсная пыль) $Q_{пр} = 8000$ кг. Из рис. 6.3 следует, что в диапазоне $\tau = (9000 \div 18000)$ с величина ρ имеет наибольшее значение порядка $\rho \approx 1,5$ км.

Наличие фонового ветра ($U_\phi > 0$) приводит к смещению (дрейфу) ПГО по направлению ветра. Если путь $\Delta x = U_\phi \cdot \Delta t$, который ПГО проходит за полчаса ($\Delta t = 1800$ с), меньше, чем сумма радиусов $\rho(x_{i+1}) + \rho(x_i)$ в моменты τ_{i+1} и τ_i , т. е.

$$x_{i+1} - x_i = U_\phi \Delta t \leq \rho(x_{i+1}) + \rho(x_i); \quad (6.43)$$

$$\Delta t = \tau_{i+1} - \tau_i$$

имеет место зона сплошного загрязнения местности с концентрацией вредных примесей $c > c_0$ в течение получаса и более. Длина данной зоны L_0 может быть рассчитана из условия $\rho(x_{i+1}) + \rho(x_i) = U_\phi \Delta t$.

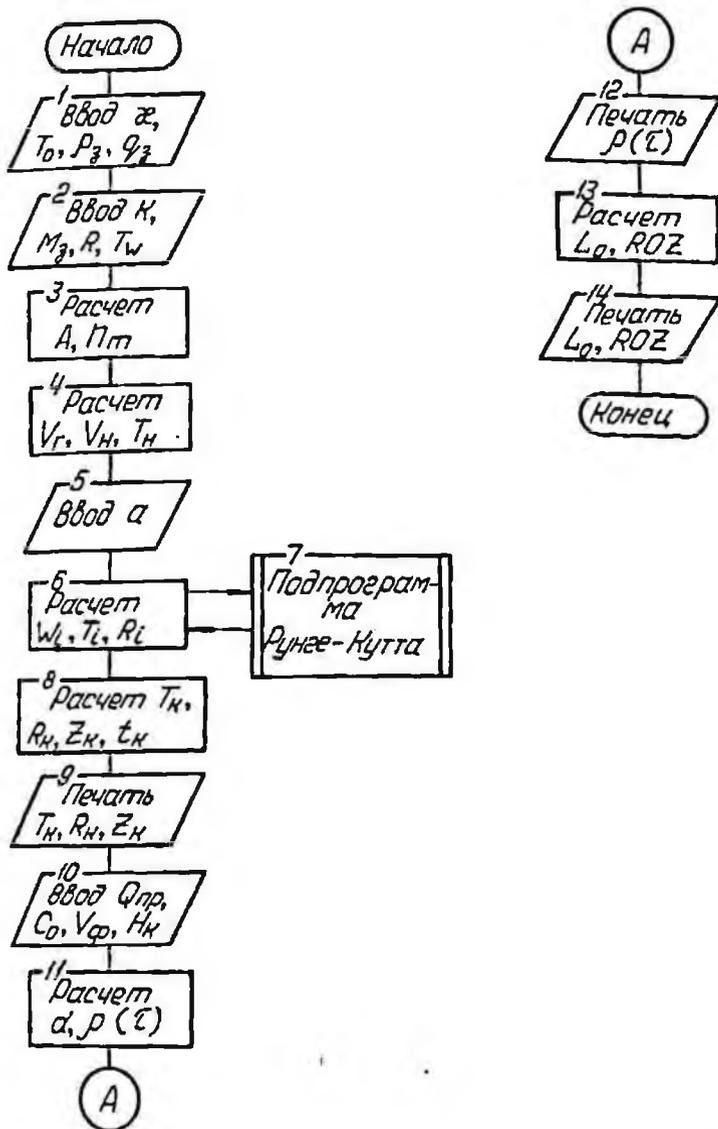


Рис. 6.2. Алгоритм расчета зоны возможного загрязнения

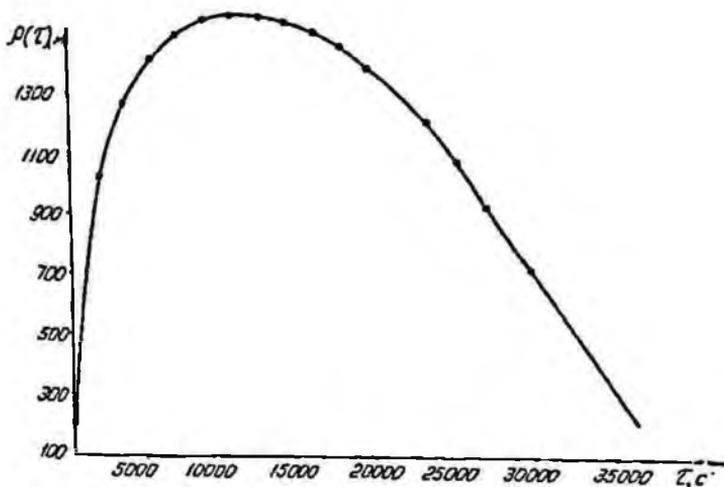


Рис. 6.3. Динамика развития пылегазового облака

На рис. 6.4 показан процесс образования зоны получасового загрязнения мелкодисперсной пылью местности, прилегающей к карьере "Мурунтау" (в северном направлении) при $M_2 = 400$ т, $Q_{пр} = 8$ т и $U_{\phi} = 1$ м/с. В случае невыполнения условия (6.43) зона получасового загрязнения местности отсутствует. Путь Δx , пройденный ПГО за полчаса, зависит от U_{ϕ} . Расчеты показали, что зависимость длины "лепестка" зоны получасового загрязнения L от U_{ϕ} имеет максимум. Кроме того, можно указать некоторое предельное значение U_{ϕ} , выше которого зона почасового загрязнения поверхности вообще отсутствует.

На рис. 6.5 приведена зависимость $L(U_{\phi})$. Кривая 1 рассчитана для $Q_{пр} = 8000$ кг (мелкодисперсная пыль), кривая 2 — для $Q_{пр} = 4000$ кг. Как следует из сравнения кривых 1 и 2, максимальная длина "лепестка" L_0 практически имеет место при штиле ($U_{\phi} < 1,5$ м/с) и пропорционально уменьшается с уменьшением $Q_{пр}$. Зона разового загрязнения вокруг карьера "Мурунтау" практически отсутствует для $M_2 = 400$ т при $U_{\phi} \geq 2$ м/с.

Анализ влияния орографии местности, прилегающей к карьере, показал, что орография слабо влияет на величину L_0 , так как высота подъема ПГО Z_k при $M_2 = 400$ т составляет $Z_k = 400 \div 550$ м.

Гораздо более сильное влияние на величину L_0 оказывает роза ветров. На рис. 6.6 показаны ЗВЗ, рассчитанные с учетом орографии и розы ветров по формулам (6.40) для $M_2 = 400$ т,

Рис. 6.4. Параметры зоны получасового загрязнения

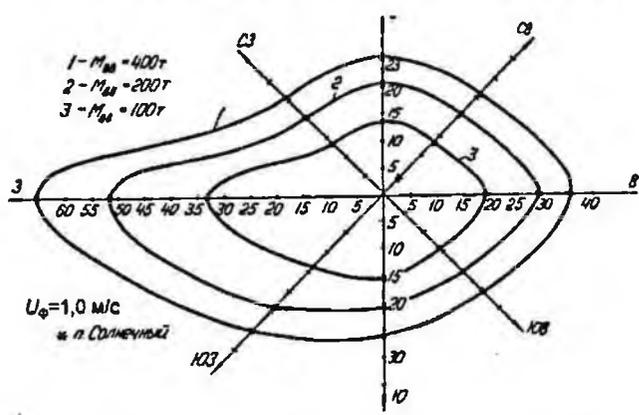
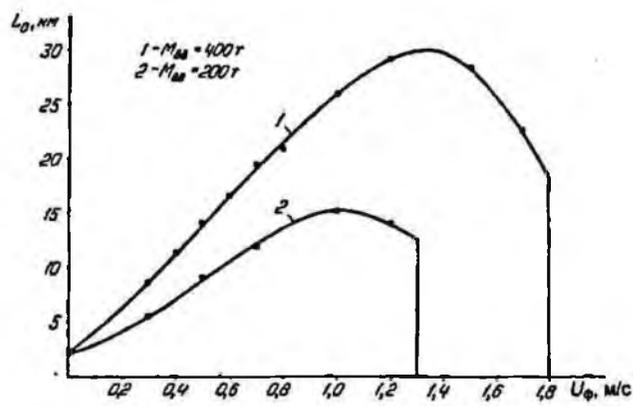
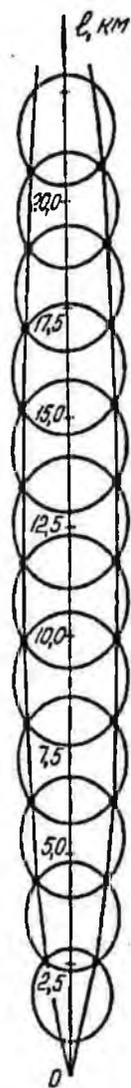


Рис. 6.5. Влияние скорости ветра на параметры ЗВЗ.

Рис. 6.6. ЗВЗ карьера "Мурунтау" при производстве массовых взрывов

$Q_{np} = 8000$ кг (кривая 1), $M_1 = 200$ т, $Q_{np} = 4000$ кг (кривая 2) и $M_1 = 100$ т, $Q_{np} = 2000$ кг (кривая 3) при $U_{\phi} = 1$ м/с. Анализ кривых рис. 6.5 показывает, что при массе заряда $M_1 > 100$ т имеет место значительное по площади разовое загрязнение местности мелкодисперсной пылью. Следует отметить, что зависимости рис. 6.3—6.6 рассчитывались в предположении, что масса примеси в процессе движения ПГО практически не меняется. В реальной обстановке происходит выпадение пыли из ПГО и, следовательно, Q_{np} уменьшается с течением времени. Поэтому зависимости рис. 6.3—6.6 следует рассматривать как предельные.

В программе предусмотрена возможность учета изменения Q_{np} по закону

$$Q_{np} = Q_{np}^n \exp(-\tau/\tau_n), \quad (6.44)$$

где τ_n — постоянная времени уменьшения массы примеси.

Таким образом, анализ влияния всех факторов на ЗВЗ при производстве массовых взрывов в карьере показал, что наиболее сильно действующим фактором является фактор фонового ветра U_{ϕ} . Рекомендуется производить взрывы при скорости ветра $U_{\phi} > 2$ м/с.

В заключение отметим, что все расчеты проводились при следующих значениях исходных данных:

$$\kappa = 1,1; T_0 = 4000 \text{ К}; \rho_3 = 750 \text{ кг/м}^3; g_3 = 0,56; k = 1,2;$$

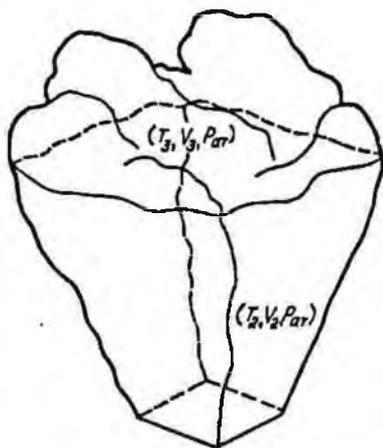
$$R = 273; T_w = 270 \text{ К}; a = 0,01; H_k = 270 \text{ м}; c_0 = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^3.$$

6.5. Оценка влияния температурной стратификации ПГО на процесс его подъема и рассеяния

Возникновение температурной стратификации в ПГО обусловлено, в самом общем смысле, следующими обстоятельствами. Во-первых, "потерянные" и отработавшие газы обладают различной эффективной теплоемкостью, а во-вторых, интенсивность их теплообмена при расширении до атмосферного давления различна. Действительно, как отмечалось ранее, истекающие из разрушенного купола горной массы отработавшие газы и пыль представляют собой единую аэрозольную систему, теплоемкость которой больше теплоемкости взрывных газов, а показатель политропы меньше показателя адиабаты (κ). Кроме того, в процессе своей эволюции эти газы взаимодействовали с

Рис. 6.7. Схематическое изображение формирующегося пылегазового облака

различными средами, отличающимися, кроме всего прочего, различной теплоемкостью и интенсивностью теплообмена: горная масса и воздух. В связи с этим их конечная температура T_2 может быть больше или меньше температуры адиабатически расширившихся до атмосферного давления "потерянных" газов T_3 .



Это различие имеет принципиальный характер в следующем смысле. Если $T_2 < T_3$, то в ПГО будет иметь место инверсионная температурная стратификация (рис. 6.7). Следовательно, на последующем этапе развития ПГО, связанном с атмосферными эффектами турбулентного перемешивания и динамического вовлечения, которые и ведут к быстрому рассеянию, размытию облака, будет происходить ослабление и частичное подавление этих эффектов. Таким образом, в этом случае будет действовать механизм локализации облака и процесс его поднятия будет иметь свойства, близкие к адиабатическим. Это, в свою очередь, означает увеличение скорости и высоты подъема ПГО, а также уменьшение интенсивности рассеяния примесей. Вследствие этого рассеяние будет происходить в большем объеме, а численные значения изолиний поля наземных концентраций примесей уменьшатся.

Если же $T_2 > T_3$, то в облаке имеет место температурная стратификация, способствующая интенсификации процессов перемешивания как внутри облака, так и самого облака с окружающей средой. Следовательно, ПГО будет быстро делокализоваться, высота и скорость его подъема уменьшатся, а большая часть примесей выпадет на площади, непосредственно примыкающей к месту массового взрыва.

Отметим, что, согласно экспериментальным наблюдениям (рис. 6.8), обычно после массового взрыва имеет место второй из описанных выше путь развития ПГО. Истекающие позднее отработавшие взрывом газы догорают первичные выбросы "потерянных" и в процессе подъема облака наблюдается интенсивное

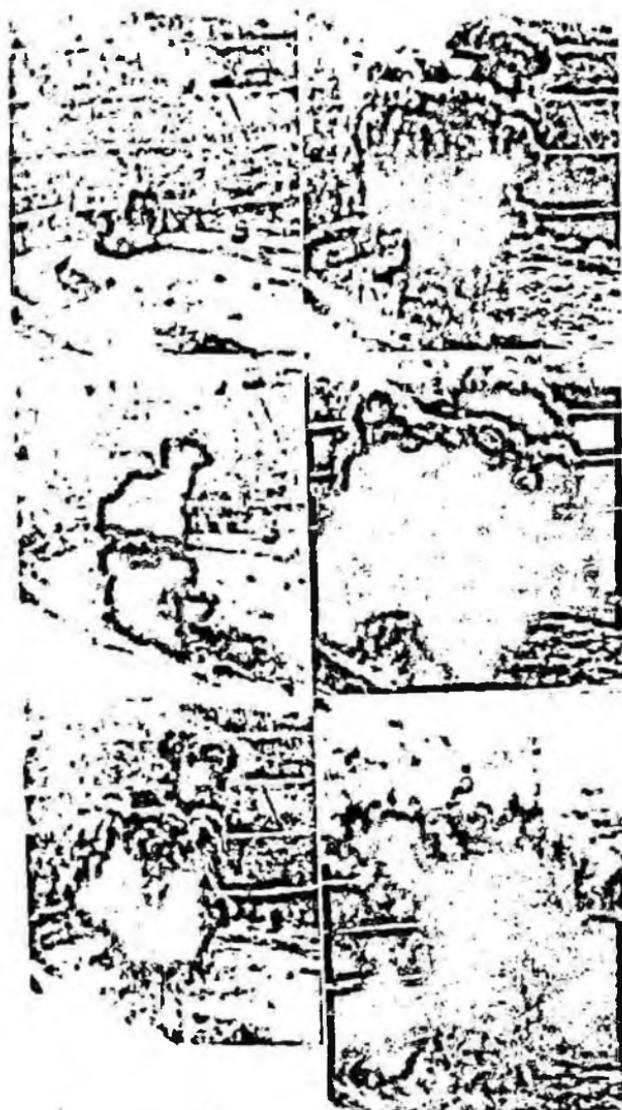


Рис. 6.8. Последовательные фотографии формирующегося ПГО

клубление, перемешивание как внутри самого облака, так и с окружающей его средой. Таким образом, температурная стратификация облака обычно способствует быстрой его делокализации и выпадению примесей вблизи места взрыва, по направлению горизонтального смещения облака согласно направлению ветра.

Описанное выше влияние температурной стратификации ПГО на процесс его подъема и последующего рассеяния дает основание для рассмотрения вопроса о возможности формирования ПГО заданной температурной стратификации с целью снижения вредного воздействия пылегазового облака на окружающую среду.

Очевидно, что если в наличии имеются эффективные средства пылегазоподавления, то в облаке желательна температурная стратификация, замедляющая его подъем и интенсифицирующая перемешивание. Следует однако учитывать, что использование этих средств при различных сезонных условиях может по-разному повлиять на процесс подъема ПГО. Так что этот вопрос требует более детального анализа. Если же средства подавления ПГО отсутствуют, то в самом общем случае желательна инверсионная стратификация, которая способствует быстрому, локализованному и более высокому подъему облака, а следовательно и последующему его рассеянию в большем объеме.

Выбор оптимальных мероприятий, снижающих вредное влияние ПГО на окружающую среду, требует более комплексного и в то же время более конкретного исследования. Действительно, в этом случае необходимо учитывать расстояние и перепад высот между местом массового взрыва и, допустим, жилой зоной, температурную и ветровую стратификацию атмосферы, т. е. интегральный коэффициент атмосферной турбулентной диффузии. Кроме того, как отмечалось, имеют значение и сезонные особенности.

В заключение следует сказать, что формирование пылегазового облака с заданной температурной стратификацией является сложной технической задачей. Возможны различные подходы. Как показывают расчеты, при проведении массового взрыва целесообразнее всего создание резкой пространственной неоднородности для потенциальных динамических свойств, используемых ВВ, например, использование сразу двух различных по свойствам ВВ или изменение у определенной части избранного ВВ термодинамических свойств с помощью какого-либо наполнителя.

Анализ существующих технологических, организационных и инженерно-технических мероприятий показывает, что предложение о формировании ПГО с требуемыми термодинамическими параметрами является новым технологическим элементом, способствующим решению задачи подавления ПГО. Действительно, в этом случае, как отмечалось, можно изменять степень локализации и время нахождения ПГО в карьерном пространстве, что оказывает существенное влияние на эффективность нейтрализации ПГО с помощью систем пылегазоподавления на базе карьерных вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М или им подобных. Кроме того, эффективность подавления ПГО можно повысить за счет искусственного изменения стратификации атмосферы карьера в зоне проведения массового взрыва. Для этой цели нами разработана технология подавления ПГО, описание которой приводится ниже.

На рис. 6.9 показано: *а* — план карьера с приведенными на нем вентиляционной бермой с размещенными на ней турбовентиляторами I, II и подготовленного к взрыву блока; *б* — момент предварительной обработки района массового взрыва мелкодисперсной водяной пылью воздушно-водяных струй турбовентиляторов; *в* — момент подавления пылегазового облака; на рис. 6.10 — графики температурной стратификации в атмосфере карьера при использовании известного (график 1) и предлагаемого (график 2) способов после предварительной обработки воздуха в районе массового взрыва мелкодисперсной водяной пылью воздушно-водяных струй в течение 10—20 мин. Из графика 1 видно, что при использовании известного способа рассеивания пылегазового облака температурной инверсии не образуется (градиент $\gamma > 0,01$ К/м), а при использовании предлагаемого способа за счет интенсивного охлаждения воздуха обеспечивается стабилизация температурной инверсии в непрерывно формируемой зоне высотой до 200 м с градиентом $\gamma_n = 0,015$ К/м.

Процесс подавления пылегазового облака по предлагаемому способу осуществляют следующим образом. На вентиляционной берме 1 (см. рис. 6.9) располагают генераторы I, II воздушно-водяных струй, например, карьерные турбовентиляторы. При этом расстояние между соседними вентиляторами $L_v = 20—25$ калибров, а расстояние по вертикали от дна карьера до вентиляционной бермы $H_v = 20—25$ калибров, воздушно-водяным струям 3 придают положительный угол наклона в вертикальной плоскости $\beta = 30—45^\circ$, что обеспечивает требуемую дальнобойность

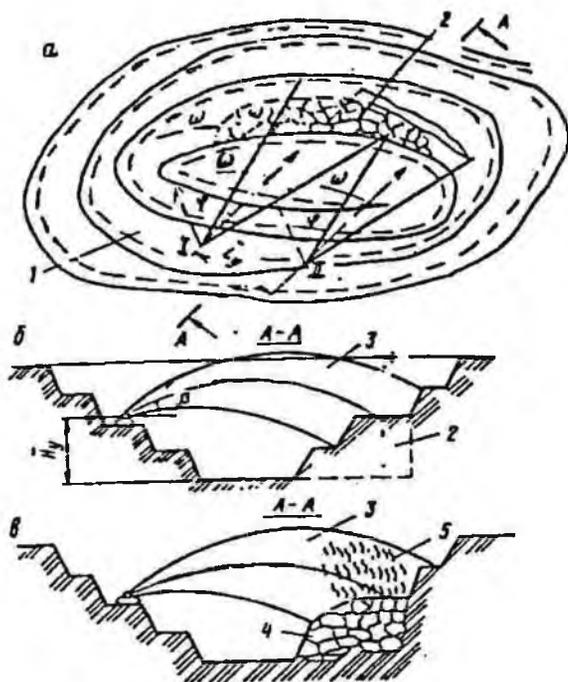
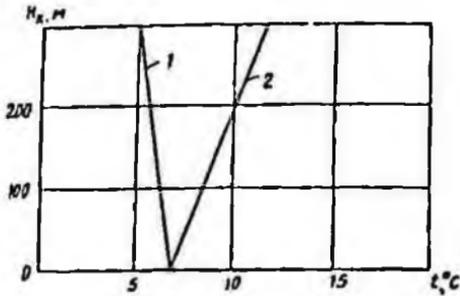


Рис. 6.9

для увлажнения воздуха над взрываемым блоком 2. Для увеличения обрабатываемой зоны вентиляторы-оросители работают в динамическом режиме с углом поворота $\varphi = 60-90^\circ$, выбираемым в зависимости от размеров взрываемого блока.

При распространении перемещающихся воздушно-водяных струй в карьерном пространстве происходят выпадение и испарение находящихся в струях капель воды, в результате чего обрабатываемый ими воздух охлаждается и в атмосфере карьера устанавливается инверсионная температурная стратификация (рис. 6.10, кривая 2), выпадающие капли производят смачивание осевшей пыли, предотвращая ее повторное взметывание.

Повышение эффективности процессов подавления пылегазового облака осуществляют путем интенсификации охлаждения воздуха на величину 4—6 К и стабилизации инверсии (поддержание отрицательного градиента температуры в слое воздуха высотой до 200 м $\gamma_n = 0,02-0,03$ К/м), орошения поверхностей



ных струй до взрыва за время τ_1 , непрерывно в момент взрыва и после взрыва в течение времени τ_2 .

Время работы вентиляторов-оросителей до взрыва определяют, исходя из того, что для уменьшения количества взметываемой в момент взрыва пыли как с поверхности взрываемого блока, так и прилегающей к блоку рабочей площадки и откосов уступов карьера необходимо произвести орошение из расчета 10 л/м^2 .

Величину площадки поверхности зоны взрыва определяют как сумму площадей поверхностей взрываемого блока и прилегающей рабочей площадки шириной $50\text{—}60 \text{ м}$.

Реальные величины площадей поверхностей взрываемых блоков составляют $1500\text{—}10000 \text{ м}^2$, а с учетом прилегающих поверхностей — $4000\text{—}16000 \text{ м}^2$.

Время работы вентиляторов-оросителей до взрыва определяют по формуле

$$\tau = \frac{h_{\text{ср}} F}{q_0 n K_p (1 - K_{\text{н}})},$$

где $h_{\text{ср}}$ — средняя толщина слоя воды на орошаемой поверхности, м;

F — орошаемая площадь поверхности, м^2 ;

q_0 — расход воды в воздушно-водяной струе $\text{м}^3/\text{с}$;

n — количество вентиляторов;

K_p — коэффициент равномерности выпадения осадков на орошаемую поверхность;

$K_{\text{н}}$ — коэффициент испарения капель при орошении.

При обработке зон массовых взрывов с площадями поверхности $4000, 8000, 16000 \text{ м}^2$, соответственно, двумя, тремя и четырьмя вентиляторами время их работы составляет $20, 24$ и 26 мин .

После предварительной обработки производят массовый взрыв, в результате которого образуется развал взорванной горной массы 4 (см. рис. 6.9) в пылегазовое облако 5. При этом вентиляторы-оросители продолжают работать в том же режиме, что и при предварительной обработке. Целесообразность непрерывной работы вентиляторов после предварительного смачивания поверхностей взрываемого блока и прилегающих площадей объясняется тем, что остановка и запуск двигателей занимает 5—8 мин, а время взрывания измеряется несколькими секундами.

Время работы вентиляторов-оросителей после взрывания определяют по формуле $\tau_2 = V_0 C_0 / E_{g0} \cdot \eta(1 - K)$, где E — коэффициент эффективности взаимодействия капель с частицами воды.

Входящие в формулу объем пылегазового облака V_0 и концентрация пыли C_0 зависят от физико-химических свойств руд и пород, технологии горных и взрывных работ. Исходные данные по массовым взрывам взяты для объемов взрываваемой горной массы 45,2; 137,1 и 223,3 тыс. м³ с соответствующими им объемами пылегазовых облаков 0,52; 6,25; 10,0 млн м³ и концентрацией пыли в облаке, соответственно, $1500 \cdot 10^{-6}$, $2300 \cdot 10^{-6}$ и $3300 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. Соответствующее время работы одного, двух и трех вентиляторов с расходами воды 250, 500 и 750 м³/ч, определенное по формуле, составляет 4,3; 14 и 29 мин. Данные расчеты подтверждаются результатами промышленных экспериментов.

При работе вентиляторов-оросителей после взрывания происходит активное воздействие воздушно-водяных струй на пылегазовое облако 5 (связывание витающей пыли и растворимых газов), интенсификация охлаждения и стабилизации температурной инверсии воздуха в районе массового взрыва, что приводит к уменьшению высоты подъема пылегазового облака. Например, при взрывании 96 т ВВ и изменении градиента температуры в слое обрабатываемого воздуха от 0,0098 до — 0,03 К/м высота подъема пылегазового облака уменьшается от 480 до 192 м и становится в большинстве случаев меньше глубины карьера.

Дальнейшую обработку пылегазового облака и района массового взрыва ведут в пределах непрерывно формирующейся инверсионной зоны.

6.6. Исследование влияния двухфазных струй на динамику ПГО. Результаты промышленных экспериментов

Уравнения движения и рассеяния ПГО могут быть получены на основе уравнений механики тел с переменной массой (уравнения Мещерского) и I начала термодинамики с учетом эффекта смещения. При этом следует учитывать, что попадание в облако капель жидкости или твердых частиц (осадков) создает в нем дополнительные силы, которые должны быть учтены в правых частях динамических уравнений для скорости и температуры ПГО [236, 237].

Если концентрация капель не очень велика, то можно считать, что дополнительная сила аэродинамического сопротивления не очень сильно отличается от уравновешивающей ее силы тяжести.

$$F' = S\omega m_g g, \quad (6.45)$$

где S — площадь горизонтального сечения облака, м^2 ;

ω — скорость подъема облака, м/с ;

g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;

m_g — масса капель, отнесенная к единице объема облака, кг/м^3 .

Тогда для уравнения изменения скорости находим

$$\omega \frac{d\omega}{dz} = g \left[\frac{T_0 - T_w}{T_w} - \frac{m_g}{\rho_w} \right] - \alpha(z) \omega^2, \quad (6.46)$$

здесь T_0, T_w — соответственно, температура ПГО и окружающего воздуха, К ;

ρ_w — плотность воздуха, кг/м^3 ;

$\alpha(z)$ — коэффициент вовлечения окружающего воздуха в ПГО при его подъеме, м^{-1} .

Наблюдения показывают, что радиус поднимающегося облака растет линейно с высотой:

$$R(z) = R_0 + 0,2z, \quad (6.47)$$

где R_0 — эффективный начальный радиус ПГО при $z = 0$, м ;

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{пго}}}{4\pi}}. \quad (6.48)$$

Исходя из этого, обычно полагают

$$\alpha(z) = \frac{3}{z_* + z}, \text{ где } z_* = 5R_0. \quad (6.49)$$

Уравнение (6.46) позволяет оценить взаимную роль перегрева облака по отношению к атмосфере (первое слагаемое в правой части), влияния на ПГО сброса жидкости (второе слагаемое) и перемешивания (третье). Следует однако учитывать то, что (6.46) представляет собой дифференциальное уравнение, которое может быть решено лишь в численном виде. Действительно, удельная масса капель приближенно равна

$$m_g = 3qt_0/4\pi R_0^3. \quad (6.50)$$

Здесь q — массовый расход жидкости в подаваемой двухфазной струе, кг/с;

t_0 — время прохождения облаком уровня, на котором размещена турбовинтовая установка, с;

$$t_0 = \int_0^{h_m + R} \frac{dz}{\omega(z)}, \quad (6.51)$$

где h_m — высота расположения установки двухфазных струй, определяемая от уровня формирования ПГО (взрываемого блока).

Как уже отмечалось, уравнение позволяет выполнить все необходимые расчеты для определения влияния двухфазных струй на динамику подъема ПГО, но оно не может быть решено аналитически. Требуется разработка численной реализации этого уравнения для последующего выполнения конкретных численных расчетов. Можно однако выполнить некоторые численные оценки, вытекающие из этого уравнения. Воздействие жидкости, выпадающей из двухфазной струи, может изменить знак ускорения ПГО, если

$$\frac{m_g}{\rho_w} = \frac{T_0 - T_w}{T_w} - \alpha(z) \omega^2. \quad (6.52)$$

В активной центральной части облака имеем $m_g/\rho_w \approx (T_0 - T_w)/T_w \approx (10^{-2} \div 10^{-3})$. Таким образом, находим $m_g \approx 1,25(10^{-2} - 10^{-3}) \text{ кг/м}^2 = 10 - 1 \text{ г/м}^3$.

Поскольку, с другой стороны, при взрыве десятков тонн объем облака составляет десятки тысяч кубических метров, согласно (6.50) имеем $m_g = 10^{-1} (q t_0)$.

Учтем теперь, что для установки НК-12КВ $q \sim 10^2$ кг/с, а время подъема ПГО до уровня h_m порядка 10 секунд, тогда получим $m_g = 10^{-1} \text{ кг/м}^3 = 100 \text{ г/м}^3$, т. е. одной установки НК-12КВ вполне достаточно, чтобы значительно затормозить подъем ПГО и существенно повлиять на его рассеяние, если масса взрыва не превышает нескольких десятков тонн.

Процессы вымывания пыли и вредных газов в ПГО при их взаимодействии с каплями жидкости или твердыми осадками можно считать аналогичными скрубберным процессам очистки. Действительно, интенсивность протекания процессов и расход жидкости позволяют достаточно убедительно рассматривать их аналогично процессам в противоточных скрубберах: 1) скорость газа в них изменяется от 0,6 до 1,2 м/с; 2) удельный расход жидкости от 500 до 8000 г/м³.

Эффективность противоточного скруббера вычисляют по формуле

$$\theta = 1 - \exp \left[\frac{3m\eta (w_r + w_k) h_c}{2d_k w_k} \right], \quad (6.53)$$

где m — удельный объемный расход жидкости, м³/м³;

w_r — скорость газа, м/с;

w_k — скорость равновесного падения капель, м/с;

h_c — высота скруббера, м;

d_k — диаметр капель, м;

η — коэффициент захвата каплями частиц определенного диаметра.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\psi}{(\psi + 0,35)^2} & m < 2 \text{ л/м}^3 \\ 1 - 0,15\psi^{-1,24} & m > 2 \text{ л/м}^3 \end{cases} \quad (6.54)$$

ψ — инерционный параметр, отличающийся от числа Стокса (St) поправкой, определяемой по справочникам.

Из соотношения (6.53) следует, что высокая степень очистки достижима для частиц диаметром больше 10 мкм.

Используя формулу (6.53) и значения фигурирующих в ней величин, характерных для взаимодействия ПГО с каплями жидкости, находим

$$St = \frac{\rho_n}{\rho \rho_w} \cdot \frac{d_n^2 w_r / d_k}{v}, \quad (6.55)$$

где v — кинематическая вязкость воздуха: $v = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;
 ρ_n — плотность пыли $\sim (2,6-3) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
 d_n — средний диаметр пыли (10^{-5} — 10^{-6}) м;
 $d_k = (10^{-4} \div 10^{-3})$ м.

$$St = \frac{1}{9} \cdot \frac{3(10^{-10} - 10^{-12}) / (10^{-4} - 10^{-3})}{1,5 \cdot 10^{-5}} = (10^{-2} - 10^2).$$

Учтем также, что в рассматриваемом случае $h_c = 10^2$ м; $m = 10^{-4} \text{ т/м}^3 = 0,1 \text{ кг/м}^3$; $w_r = 1 \text{ м/с}$; $w_k = 10^{-1} \text{ м/с}$. Таким образом, находим по формуле (6.53)

$$\theta = 1 - \exp[-(1 \div 1,5)] = (0,65 \div 0,9),$$

т. е. эффективность вымывания пыли из ПГО при его обработке двухфазной струей может достигать 65—90 % в зависимости от диаметра пыли (дисперсности). Численные оценки выполнены для взрыва массы порядка десятков тонн и расхода жидкости, подаваемой двухфазной струей порядка 100 кг/с.

Промышленные эксперименты по подавлению ПГО с помощью воздушно-водяных струй, создаваемых вентиляторами НК-12КВ и НК-12КВ-1М, были проведены в июне 1980 г. на карьере № 24 Целинного горнохимического комбината. Методику и результаты экспериментов по активному подавлению ПГО приводим ниже. В день проведения эксперимента через каждый час зондируется атмосфера карьера с помощью привязного радиозонда, сигналы которого регистрируются на ленте ондулятора. Не позднее чем за 1—1,5 часа до взрыва по команде руководителя эксперимента, передаваемой с помощью радиостанций типа "Кактус" машинисты вентиляторных установок запускают двигатели и производят "пристрелку" воздушно-водяных струй по месту взрыва с целью определения зоны активного воздействия и оптимального угла наклона струй. Корректировка осуществ-

ляется по командам руководителя с учетом скорости и направления ветра, определяемым метеостанцией М-49, размещенной в лаборатории "Карьер-1" или с помощью анемометра и анеморумбометра.

После окончательного согласования времени взрыва руководитель эксперимента по сигналу диспетчера карьера подает машинистам команду "запустить двигатель". После запуска и опробования двигателей руководитель эксперимента сообщает через диспетчера карьера о готовности начальнику взрывных работ, который подает взрывнику предупредительный и боевой сигналы. По боевому сигналу взрывником зажигается огнепроводный шнур (время горения 3—4 мин), машинисты выводят двигатели на рабочий режим (0,85 номинала) и подают в водораспределительные сопла установок воду. Наведя на место взрыва воздушно-водяные струи, машинисты вместе с остальными участниками эксперимента укрываются в блиндаже, находящемся возле вентиляторов. После взрыва по сигналу начальника взрывных работ машинисты вентиляторных установок переходят в кабины и управляют по командам руководителя процессом подавления пылегазового облака.

Фото- и кинооператоры фиксируют характерные моменты развития процессов активного воздействия струй на пылегазовое облако. Отборщиком проб, находящемся в блиндаже взрывника, регистрируется динамика происходящих процессов с помощью пылемера ИЗВ-3. По окончании эксперимента производится зондирование атмосферы карьера.

11 июля 1980 г. впервые в практике открытых горных работ был осуществлен промышленный эксперимент с целью проверки возможности предотвращения загрязнения окружающей среды продуктами массовых взрывов ВВ путем активного воздействия на пылегазовое облако воздушно-водяными струями карьерных вентиляторов НК-12КВ. Взрыв был произведен на высоте +40 м, заряд тротила составлял 10 т. Два вентилятора НК-12КВ располагались на отметке +100 м юго-западного борта карьера. После боевого сигнала начальника взрывных работ двигатели обоих вентиляторов были выведены на рабочий режим (0,85 номинала). Через 1 минуту в водораспыляющие сопла обеих установок была подана вода, и воздушно-водяные струи направлены на место взрыва под углом наклона +20°. Расход воды в струе вентилятора № 1 составлял 120 м³/ч, а в струе вентилятора № 2—180 м³/ч. Скорость северо-восточного ветра составляла 1,5—2 м/с.

Управление процессом управления пылегазового облака осуществлялось по командам руководителя эксперимента, передаваемым по радию машинистам-операторам. Угол поворота струи составлял 90° . Характерные моменты развития процессов активного воздействия воздушно-водяных струй на пылегазовое облако фиксировались фото- и кинооператорами с отметки +100 м фотоаппаратом "Зоркий-4" и кинокамерами типа "Красногорск" и "Кварц". Время работы вентиляторов в оросительно-вентиляционном режиме составило 12 минут.

17 июня 1980 г. эксперимент был повторен. Заряд ВВ (тротила) составлял 6 т, место взрыва находилось за развалом горной массы, образованного при первом эксперименте (11 июля). Вентиляторы работали в оросительно-вентиляционном режиме 15 минут. Скорость встречного ветра составляла 2—2,5 м/с.

Третий эксперимент был проведен при штиле 26.07.80 г., заряд тротила составлял 10 т. Место взрыва находилось на отметке +70 м в северной части карьера.

Во всех случаях через 7—10 минут работы установок атмосфера карьера очищалась от продуктов взрыва, большая часть которых была осаждена внутри карьерного пространства.

В результате проведенных экспериментов была проверена возможность решения экологической проблемы на открытых горных работах и отработана технология активного подавления пылегазового облака воздушно-водяными струями вентиляторов-оросителей НК-12КВ. Эффективность процессов пылегазоподавления при массовых взрывах может быть повышена за счет увеличения расхода воды в струе каждого вентилятора до 240—300 м³/ч.

На рис. 6.11 представлены моменты (1—4) активного воздействия воздушно-водяных струй вентиляторов на пылегазовое облако.

Первые промышленные эксперименты на карьере ЦГХК показали принципиальную возможность использования вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М для активного воздействия на пылегазовое облако (ПГО) при производстве массовых взрывов.

Эффективность подавления пылегазового облака можно повысить за счет хемосорбции, происходящей под воздействием водных растворов Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 с вредными газами (NO_x и CO), адсорбированными пылевыми частицами, содержащими



Рис. 6.11. Активное воздействие воздушно-водяных струй на пылегазовое облако

полярные адсорбенты Fe_2O_3 , CaO , MgO и др. Химические реакции происходят по формулам (5.2)—(5.12). Отличительной особенностью подавления ПГО с помощью водных растворов солей кремниевой кислоты является образование селикагеля из гидрогеля H_2SiO_3 вследствие испарения под воздействием высокой температуры. Селикагель является хорошим полярным адсорбентом — удельная поверхность 200—600 $\text{м}^2/\text{г}$, объем пор 0,4 $\text{см}^3/\text{г}$, средний диаметр пор $(30 \div 200) \cdot 10^{-11}$ м и имеет структуру полимера.

ГЛАВА 7

ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЯ, ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ

7.1. Оценка токсичности выхлопных газов карьерных вентиляторов-оросителей на основе ТВД

В ГОСТ 17.2.2.04—86 “Двигатели газотурбинных самолетов гражданской авиации. Нормы и методы определения выбросов загрязняющих веществ” количество вредных примесей — несгораемых углеводородов и СО предлагается определять по величине г/кН, а оксидов азота — в зависимости от степени сжатия. Однако эти показатели не позволяют определить интенсивность выбросов. Кроме того, в ГОСТе нет нормативов по одному из высокотоксичных компонентов — бенз(а)пирену.

Интенсивность выделения вредных примесей можно определять по результатам фактических замеров концентраций различных компонентов и расходу газа:

$$G_i = c_i Q, \quad (7.1)$$

где c_i — концентрация i -го компонента, г/м³;

Q — расход газовой струи, м³/с.

На основании химического анализа проб выхлопных газов турбовинтового двигателя АИ-20КВ установлено, что концентрация в них оксида углерода СО составляет $C_{CO} = 125$ мг/м³, оксидов азота $C_{NO_x} = 48$ мг/м³. Поскольку по качеству процесс сгорания в турбовинтовых двигателях различных типов не отличается, можно принять эти значения концентраций примесей и для двигателя НК-12КВ. Отличаются двигатели АИ-20 и НК-12КВ по расходу газов реактивного выхлопа. У последнего $Q_{or} = 100$ м³/с.

В связи с тем, что струя выхлопных газов у НК-12КВ распространяется в спутной струе воздуха ($Q_{ac} = 1680$ м³/с), создаваемой воздушными винтами, концентрация вредных примесей в газовой струе составляет $C_{CO} = 7,0$ мг/м³, а $C_{NO_x} = 2,7$ мг/м³.

Поскольку расход воздуха в струе изменяется по закону [157]

$$Q_r = 4,36Q_0(a\bar{x} + 0,145), \quad (7.2)$$

где $a = 0,1$ — коэффициент структуры струи;

Q_0 — расход воздуха в начальном сечении, $\text{м}^3/\text{с}$,
то уже на расстоянии пяти калибров ($x = 28 \text{ м}$) за счет вовлечения в струю окружающего воздуха концентрация примесей снизится в 2,8 раза и составит $C''_{\text{CO}} = 2,5 \text{ мг}/\text{м}^3$, $C''_{\text{NO}_x} = 1 \text{ мг}/\text{м}^3$, что меньше ПДК.

По данным НИИ онкологии и радиологии Минздрава Узбекистана средняя концентрация бенз(а)пирена в струе НК-12КВ-1М составляет на расстоянии 10 калибров ($x = 60 \text{ м}$) $(C_{\text{БП}})_{\text{ср}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ г}/\text{м}^3$. Так как у полуограниченных струй вследствие деформации профилей скорости, температуры и концентрации примеси значения параметров у поверхности земли равны средним значениям по сечению на расстоянии 5 калибров, на основании закона сохранения массы и уравнения неразрывности можно определить концентрацию бенз(а)пирена в начальном сечении газовой струи: $(C_{\text{БП}})_0 = 5 \times 1,6 \times 10^{-9} = 8,0 \times 10^{-9} \text{ мг}/\text{м}^3 \ll \ll (C_{\text{БП}})_{\text{ПДК}}$. При этом концентрация бенз(а)пирена в струе реактивных газов составит $0,144 \times 10^{-6} \text{ мг}/\text{м}^3$.

Таким образом, интенсивность выделения вредных примесей в ОГ НК-12МВ составляет:

$$F_{\text{CO}} = 125 \text{ мг}/\text{м}^3 \times 100 \text{ м}^3/\text{с} = 12,5 \text{ г}/\text{с};$$

$$F_{\text{NO}_x} = 48 \text{ мг}/\text{м}^3 \times 100 \text{ м}^3/\text{с} = 4,8 \text{ г}/\text{с};$$

$$F_{\text{БП}} = 8,0 \times 10^{-9} \text{ г}/\text{м}^3 \times 1800 \text{ м}^3/\text{с} = 1,44 \times 10^{-6} \text{ г}/\text{с}.$$

Сравнительный анализ токсичности отработавших газов автосамосвала БелАЗ-7519 и вентилятора НК-12КВ-1М приведен в табл. 7.1. Расчет показателей токсичности выполнен на основании работ [195, 238, 239] и результатов замеров концентраций примесей в реактивном выхлопе ТВД вентиляторов. Из таблицы 7.1 следует, что по валовому приведенному выбросу вредных примесей ТВД карьерного вентилятора НК-12КВ-1М эквивалентен двум автосамосвалам БелАЗ-7519.

Однако следует учесть, что основные режимы работы вентилятора предусматривают применение воды, подводимой к струе реактивных газов через гидравлическое сопло. При этом обеспечивается очистка ОГ от токсичных компонентов за счет абсорбции последних жидкостью, абсорбции на поверхности твердого вещества (пыль, сажа) или химического превращения в безвредный газ при использовании растворов солей Na_2CO_3 и

Таблица 7.1
Сравнение показателей токсичности дизеля и ТВД вентилятора

Наименование токсичных компонентов	Интенсивность выброса компонентов в ОГ, г/с		ПДК рабочей зоны, г/м ³	Показатель относительной токсичности, ед. токсичности CO	Концентрация компонентов в ОГ в газоподушной струе, г/м ³		Относительная интенсивность выделения компонентов, г CO/с	
	БелАЗ-7519	НК-12ВМ			БелАЗ	НК-12ВМ	БелАЗ	НК-12ВМ
Оксид углерода	1,23	12,5	0,02	1,0	0,667	0,007	1,23	12,5
Углеводороды	0,24	—	0,3	0,6	0,134	—	0,15	—
Оксиды азота	1,07	4,8	0,005	41,1	0,584	0,0027	44,0	131,5
Диоксид серы	0,465	0,642	0,01	11	0,253	0,0004	5,1	7,1
Сажа	0,3	0,128	0,001	41,5	0,163	7·10 ⁻⁵	12,5	4,4
3,4-бенз(а)пирен	0,21·10 ⁻⁴	1,44·10 ⁻⁶	0,15·10 ⁻⁶	1,26·10 ⁶	11,4·10 ⁻⁶	0,008·10 ⁻⁶	26,5	1,8
Валовый приведенный выброс, гCO/с							89,48	153,3

Таблица 7.2
Анализ газовых проб, отобранных при работе ТВД на авиационном и тракторном керосинах

Режим работы двигателя	Содержание по объему, %							
	в нахлесте (лабораторный метод)					в 100 м от установки (экспресс-прибор)		
	CO ₂	CO	NO ₂	Акрилен	O ₂	NO ₂	CO ₂	CO

Авиационный керосин ТС-1

Малый газ	1,6	0,015	18,7	Нет	0,0001		Нет
0,4 номинала	1,5	0,01	18,1	"			"
0,6 "	1,9	0,015	18,0	"	0,00013		"
0,7 "	2,0	0,01	18,3	"	1,00048		"
0,85 "	2,2	0,01	18,0	"	0,00086		"

Тракторный керосин

Малый газ	1,0	0,06	19,3	0,000135	0,001	0,0003	Нет	0,001
0,4 номинала	1,5	0,035	19,0	0,00044	0,0016	0,0004	"	0,0005
0,6 "	1,6	0,02	19,0	0,00053	0,0025	0,0004	"	Следы
0,85 "	1,9	0,02	18,1	0,00128	0,0031	0,0004	"	Нет
Номинальный	1,8	0,02	18,2	0,0005	0,0039	0,0004	"	"

K_2SiO_3 . Исследованиями В. А. Христича и А. Г. Тумановского установлено, что за счет введения воды в ТВД можно существенно сократить количество окислов азота в ОГ. Так, при $G_n = 0,5G_r$ концентрация NO_x снижается в 2 раза [239].

Исследования токсических показателей ТВД показали, что состав выхлопа зависит как от режима работы двигателя, так и от вида топлива. В таблице 7.2 приведены результаты анализов газовых проб, отобранных при работе ТВД с отработанным летным ресурсом на авиационном и тракторном керосинах.

Приведенные данные свидетельствуют о возрастании концентрации окислов азота с увеличением нагрузки и об ухудшении токсической характеристики двигателя при переходе на тракторный керосин.

7.2. Акустические характеристики вентиляторов-оросителей

Основными источниками шума, возникающего при работе наземных установок на базе авиационных ТВД, являются воздушный винт, внутренние агрегаты двигателя и струя выхлопных газов. Вследствие того, что уровень громкости шума этих источников превышает предельно допустимые значения, возникает необходимость соблюдения пауз после определенного периода работы установок, что снижает эффективность их использования.

Возникновение шума воздушного винта (звук вращения) обусловлено наличием разности давлений на двух сторонах лопасти, образованием вихрей, а также вибрацией лопастей и вала. Причинами возникновения высокочастотного шума на срезе реактивного сопла являются высокая степень турбулентности и большие градиенты скорости струи газов. Шум внутри ТВД обусловлен срывом вихрей с выходных кромок лопаток, приводящим к изменению давления и вызывающим беспорядочную вибрацию лопаток компрессора и турбины. Таким образом, при борьбе с шумом, возникающим при работе наземных установок на базе авиационных ТВД, необходимо учитывать природу каждого источника шума.

Вследствие того, что уровень низкочастотного шума (при работе винта) снижается звукопоглощающими материалами незначительно, эффективным средством борьбы с таким шумом является улучшение условий работы воздушного винта. Размещая винт в кольцевом кожухе, можно добиться не только умень-

шения срывов вихрей с концов лопастей, но и уменьшения вибраций, благодаря равномерному распределению тягового усилия между винтом и кольцом. Заполнение элементов конструкции кольцевого кожуха вспененными пластмассами и обработка внутренней поверхности вибродемпфирующей мастикой ВД-17 позволят снизить уровень громкости шума на 15—20 дБ. Перспективным средством борьбы с шумом могут оказаться и противозумные устройства, принцип работы которых заключается в наложении уловленных микрофонами усиленных и сдвинутых по фазе на 180° звуковых волн на шум источника. Принцип действия известных глушителей шума реактивной струи основан на сдвиге уровня шума в область высоких частот и последующем подавлении его активными глушителями. Наиболее эффективным является глушитель, имеющий на срезе сопла 6 гофр с заглублением в струю на $1/3$ радиуса. Гофры выполняются в виде шлицев, стенки которых сходятся под углом 12° к крепежному фланцу. Глушителем шума такой конструкции оборудован вентилятор НК-12КВ [149].

Анализ влияния впрыскивания воды на шум реактивной струи свидетельствует о довольно высокой эффективности этого способа улучшения акустических характеристик наземных установок на базе авиационных ТВД. Были проведены акустические съемки рабочих мест в Центральном карьере Гороблагодатского рудоуправления (рис. 7.1) при работе вентилятора в вентиляционном и вентиляционно-оросительном режимах. Измерения уровней громкости шума выполнялись прецизионным шумомером PSI 202 с октавным фильтром OF-101. Введение воды в реактивную струю (рис. 7.2) позволяет снизить уровень громкости шума в полосе низких и средних частот на 2—14 дБ и в полосе высоких частот от 2—10 дБ. При этом существенно уменьшается вредное воздействие шума на машиниста-оператора в полосе низких и средних частот на 2—7 дБ и в полосе высоких частот на 10—40 дБ.

Анализ акустических характеристик (на $f = 1000$ Гц) рабочих мест в карьере при изменении режимов работы авиадвигателя (рис. 7.3) показал, что оросительно-вентиляционный режим работы вентилятора позволяет по сравнению с вентиляционным снизить уровень громкости шума установок на базе авиадвигателей НК-12КВ на 2—7 дБ. Приемлемые эксплуатационные режимы вентилятора НК-12КВ приведены в таблице 7.3.

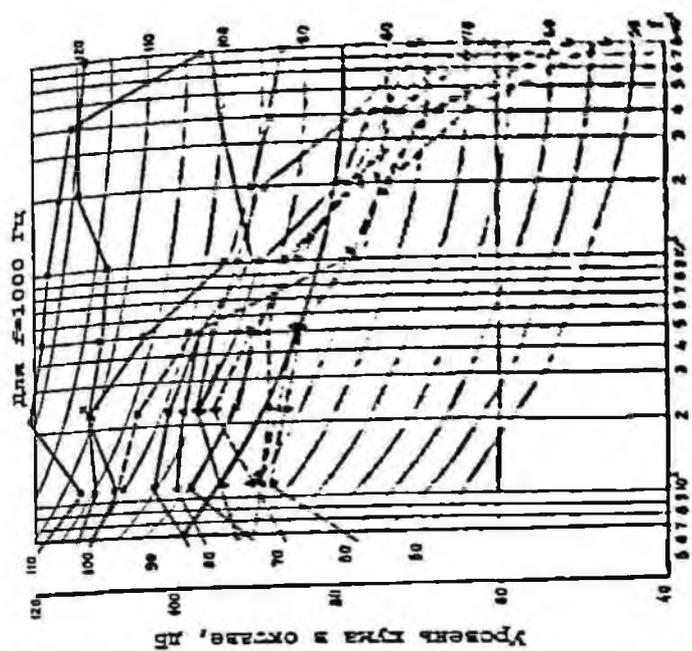


Рис. 7.1. Расположение точек измерений при съемке акустических характеристик реактора мест

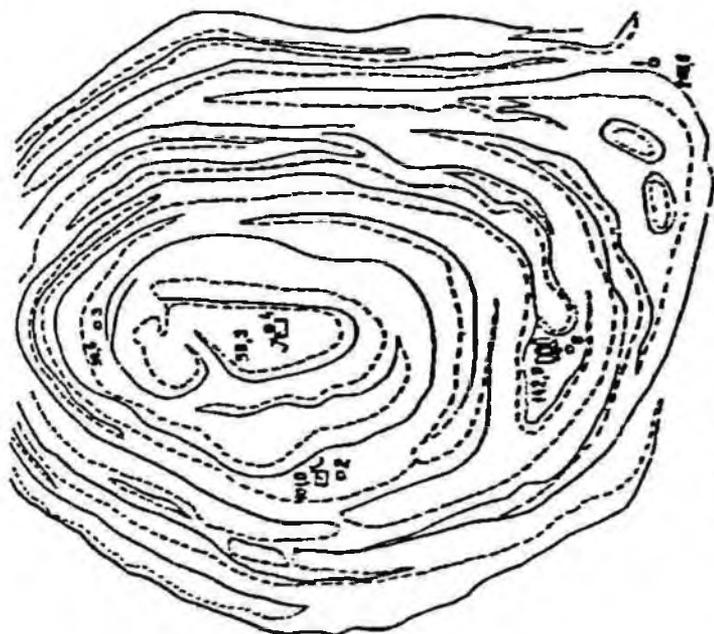


Рис. 7.2. Влияние вхождения воды в реактивную струю вентилятора на акустические характеристики реактора мест.
 ◆ — точка 1; ● — точка 2; ▼ — точка 3; ▲ — точка 4; ■ — точка 4; □ — в кабине; ○ — точка 1; × — в кабине (без трассы стальной); — без вала; — — — — — индий

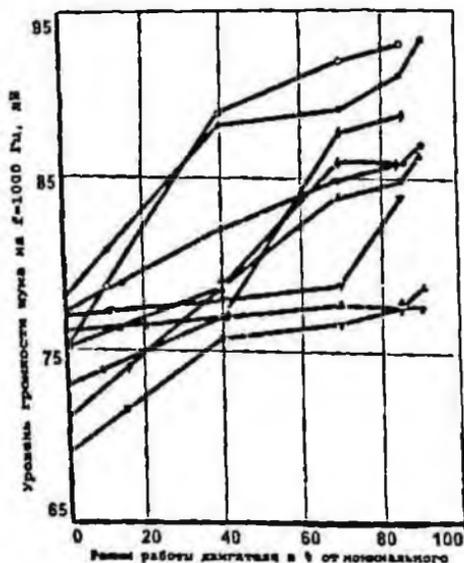


Рис. 7.3. Влияние введения воды в реактивную струю на акустические характеристики рабочих мест в карьере при изменении режимов работы авиадвигателя:
 ◆ — точка 1; ● — точка 2; ▼ — точка 3;
 ■ — точка 4; ○ — в кабине; — — — без воды; - - - с водой

При модернизации вентилятора предусмотрены акустическая обработка кожуха, глушитель шума реактивного выхлопа и активный шумоглушитель. Кожух представляет собой сварную конструкцию с внутренней и наружной

стенками из листовой стали. Внутренняя стенка перфорирована, а пространство между стенками заполнено звукопоглощающим материалом, например, пенополиуретаном ППН 225. С целью уменьшения вибрации наружная стенка кожуха покрывается вибродемпфирующей мастикой.

Для принятой схемы расчетная звукопоглощающая способность кожуха была определена по формуле

$$R_{кр} = \alpha_k S_k - \tau_k S_{ист}, \quad (7.3)$$

где $\alpha_k = 0,55$ — коэффициент звукопоглощения винипора (пенополиуретана) для $f = 250$ Гц, дБ/м²;

$\tau_k = 1$ — коэффициент звукопроводности кожуха со стороны всаса и нагнетания вентилятора, дБ/м²;

$S_{ист} = 48,4$ — площадь источника звука, м²;

$S_k = 136,5$ — внутренняя поверхность кожуха, м².

Расчетная величина снижения звуковой мощности равна 16,6 дБ. Для снижения уровня интенсивности звука в полосе высокочастотного спектра на срезе реактивного сопла установлен глушитель [149].

Для более эффективного снижения шума, генерируемого воздушными винтами, вентилятор снабжен устройством для распыления и ввода в компрессор воды [176, 177]. В результате это-

Таблица 7.3

Влияние работы вентилятора НК-12КВ на акустические характеристики рабочих мест и рекомендуемые режимы эксплуатации установок

Место замера		Номера оценочных точек в рабочей зоне по рис. 7.1	Отметка турбины, м	Расстояние от турбины до рабочего места, м	Номера оценочных точек в рабочей зоне по рис. 7.2	Режим работы	Режим работы двигателя (в % от номинала) при следующих параметрах оценочных точек				Режим эксплуатации вентиляторной установки		
Номер точки по рис. 7.1	Расстояние от турбины до рабочего места, м						Отметка турбины, м	(t)	40	70*	85*	Время работы, мин	Пазулы, мин
1	275	+70	65	Вентиляционный	65	85	90	95	45*	15*	15*	15*	
2	210	-40	65	оросительный	70	85	90	90	120*	12*	—	—	
3	410	-50	60	Вентиляционный	90	85	90	90	120—45*	13—16*	15*	15*	
4	250	-80	65	оросительный	85	80	85	85	Не ограничено	—	—	—	
5	700	+130	80	Вентиляционный	75	85	90	90	Не огр.	12*	—	—	
				оросительный	80	90	95	100	Не ограничено	—	12—16*	15*	15*
				оросительный	75	80	85	85	Не ограничено	—	—	—	—
				оросительный	70	80	85	85	Не ограничено	—	—	—	—
				оросительный	70	70	80	85	Не ограничено	—	—	—	—

*Показатели со звездочкой относятся к режимам работы двигателя 70 и 85 % номинального.

Таблица 7.4

**Интегральная оценка уровней интенсивности звука
и рекомендуемые режимы эксплуатации карьерных вентиляторов
оросителей НК-12КВ и НК-12КВ-1М**

Место замеров			Номера оценочных кривых интегрального уровня интенсивности звука на рис. 7.2		Режимы эксплуатации вентиляторов НК-12КВ					
					ВУ № 1 (без кожуха)			ВУ № 2 (с кожухом)		
Номер точки на рис. 7.4	Расстояние, м	Отметка горизонта, м	ВУ № 1 без кожуха	ВУ № 2 с кожухом	Время работы, мин	Пауза, мин	Допустимое число периодов включения в день	Время работы, мин	Пауза, мин	Допустимое число периодов включения в день
1	430	+190	80	80	Не огр.	—	—	Не огр.	—	—
2	110	+170	80	75	Не огр.	—	—	Не огр.	—	—
3	270	+160	95	90	50	12	30	120	16	25
4	550	+130	75	75	Не огр.	—	—	Не огр.	—	—
5	470	+100	85	80	Не огр.	—	—	Не огр.	—	—
6	330	+100	85	80	Не огр.	—	—	Не огр.	—	—
7	190	+55	90	85	120	16	25	Не огр.	—	—
8	390	+100	95	90	50	12	30	120	16	25

го перед воздушным винтом и за ним на пути распространения звуковых волн образуется завеса из капелек воды. Распыленные частицы воды засасываются струей воздушного винта в кожух, где происходит дальнейшее их дробление и интенсивное испарение. Это приводит к образованию в кожухе зоны повышенной влажности, что также способствует снижению уровня интенсивности звука, генерируемого воздушными винтами и двигателем. Кроме того, уровень шума, возникающий при работе компрессора двигателя, может быть снижен с помощью специального входного аппарата [240].

В целом разработанная система глушения шума снижает уровень интенсивности звука на 3—11 дБ (звуковой мощности в 2—5 раз) в зависимости от частоты, что позволяет уменьшить радиус дискомфортной зоны до 100—120 м.

Результаты интегральной оценки уровней интенсивности звука, замеренных в карьере Цилиндрного горно-химического комбината (таблица 7.4, рис. 7.4) позволили определить рациональные режимы эксплуатации вентиляторов. Установлено, что за счет размещения винтомоторной группы в звукоизолирую-

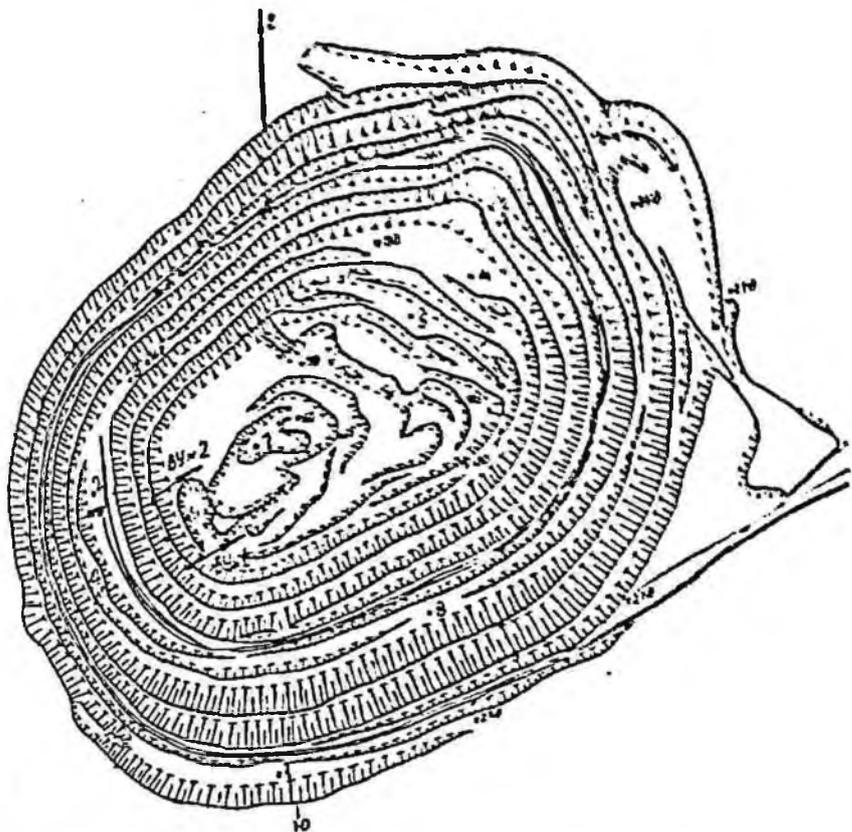


Рис. 7.4. Схема расположения точек замера уровней громкости шума в карьере ЦГХК

щем кожухе допустимое время непрерывной работы увеличивается в 2,4 раза, интегральный уровень интенсивности звука ($Вт/м^2$) снижается в 3 раза.

7.3. Экономическая оценка электрического и газотурбинного привода мощных карьерных вентиляторов

Как следует из данных института Гипроруда, ни одно из существующих горных предприятий не имеет в настоящее время резерва установленной мощности, достаточного для питания средств общеобменной искусственной вентиляции на базе электропривода с параметрами НК-12КВ. В связи с этим при выборе

типа привода мощных карьерных вентиляторов необходимо произвести технико-экономическое сравнение систем искусственной вентиляции с электрическим и газотурбинным приводом рабочего органа. Сравнение выполнено для карьеров Лебединского, Михайловского и Стойленского ГОКов. При этом считаем, что электрический привод должен обеспечить такие же параметры систем вентиляции, как и газотурбинный (НК-12КВ). На эксплуатационном режиме работы двигателя карьерного вентилятора НК-12КВ (0,85 номинала) мощность привода рабочего органа — двух соосных винтов АВ-60К противовращения — составляет 11000 кВт. Рассмотрим целесообразность замены газотурбинного двигателя НК-12МВ двумя электродвигателями $N = 5500$ кВт. Расчет балансовой стоимости вентиляторов проводится по формуле

$$C_{\text{бл}} = K_{\text{тс}} \sum_{i=1}^n C_i + C_{\text{м}}, \quad (7.4)$$

где $K_{\text{тс}} = 1,12$ — коэффициент, учитывающий транспортно-складские расходы;

C_i — оптовая цена комплектующих изделий, рублей;

$C_{\text{м}}$ — стоимость монтажных работ, рублей.

При расчете капитальных затрат по варианту с электроприводом необходимо учесть стоимость трансформаторов напряжением 110/6 кВ, линий электропередачи 6 кВ, распределительных и приключательных пунктов, передвижных подстанций.

Эксплуатационные расходы на систему искусственной вентиляции представляют собой статьи затрат на зарплату, горюче-смазочные материалы, электроэнергию, отчислений на капитальный ремонт, техобслуживание и текущий ремонт. При сравнении вариантов привода вентиляторов полагаем списочный состав службы ПВС идентичным.

Расчет затрат на зарплату службы ПВС производится по формуле

$$Z_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot \sum_{i=1}^n n_i C_i \tau_i, \quad (7.5)$$

где $K_1 = 1,4$ — коэффициент доплат;

$K_2 = 1,079$ — коэффициент, учитывающий отчисления на соцстрах;

n_i — количественный состав i -й должности службы ПВС;
 C_i — часовая тарифная ставка i -й должности, руб/ч;
 τ_i — время работы i -й должности, ч.

При расчете полагаем, что, за исключением машинистов и их помощников, все категории трудящихся службы работают круглый год.

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_6 = \tau_7 = 236 \text{ смен.} \quad (7.6)$$

Машинисты и их помощники работают в период проветривания карьера:

$$\tau_4 = \tau_5 = \tau_8. \quad (7.7)$$

При использовании электрического привода рабочего органа вентилятора затраты на электроэнергию можно определить по формуле:

$$Z_{эл} = C_y \cdot N_r \cdot 0,3 + C_{н} N_{дв} \cdot z \cdot \tau_n, \quad (7.8)$$

где C_y — 2-ставочный тариф за один кВА установленной мощности трансформаторов, руб/кВА;

N_r — суммарная установочная мощность трансформаторов системы вентиляции, кВА;

$C_{н}$ — тариф за 1 кВт·ч потребленной электроэнергии, руб/кВт·ч;

$N_{дв}$ — мощность привода рабочего органа вентилятора, кВт;

z — количество вентиляторов;

τ_n — время работы системы вентиляции, ч.

При использовании газотурбинного привода рабочего органа вентилятора затраты на горючесмазочные материалы определяются по формуле

$$Z_{ГСМ} = C_r \tau_n G_r z, \quad (7.9)$$

где $C_r = 43$ — стоимость 1 т ГСМ, руб/т;

τ_n — время работы системы вентиляции, ч;

$G_r = 2500$ — часовой расход топлива двигателя вентилятора НК-12КВ, кг/ч;

z — количество вентиляторов в системе.

При норме отчислений 8,4 % затраты на капитальный ремонт определяются по формуле

$$Z_{кр} = 0,084 \cdot Z_k, \quad (7.10)$$

Таблица 7.5
Сравнение технико-экономической эффективности электрического
и газотурбинного привода карьерных вентиляторов

Показатели работы карьера	Карьер		
	Лебдинский	Михайловский	Стойленский
Производительность по сырой руде, т·10 ⁶	35,523	25,526	4,655
Эксплуатационные расходы, руб·10 ⁶	<u>77,124</u>	<u>77,20</u>	<u>32,10</u>
	77,54	77,50	32,32
Себестоимость, руб/т	<u>2,17</u>	<u>3,08</u>	<u>6,896</u>
	2,183	3,092	6,942
Удельные капитальные затраты, руб/т	<u>1,078</u>	<u>2,21</u>	<u>8,775</u>
	1,087	2,225	8,850
Годовой экономический эффект, руб·10 ³	<u>795</u>	<u>593</u>	<u>787</u>
	286	236	516

Примечание. 1. Над чертой — при газотурбинном приводе, под чертой — при электрическом приводе.

2. Цены 1990 г.

Таблица 7.6

Наименование параметра	Единицы измерения	Индекс	Значение параметра
Мощность привода вентиляторов НК-12КВ-1М АВК-35Э	кВт (л. с.)	N_1	6431(8750)
		N_2	5888(8000)
Расход керосина ТС-1, ТС-2 НК-12КВ-1М АВК-35Э	кг/с (кг/г)	m_1	0,64(2300)
		m_2	0,693 (2496)
Теплотворная способность керосина	кДж/кг	q_k	43000
Теплотворная способность природного газа (бухарского месторождения)	кДж/м ³	q_k	34150
Плотность газа	кг/м ³	ρ_2	0,733
Стоимость керосина* ТС-1 Т-2	руб/кг	C_{K1}	0,078
		C_{K2}	0,077
Стоимость газа**	руб/1000 м ³	C_G	18
Стоимость электроэнергии	руб/кВт·ч	C_e	0,01
Плата за установленную мощность	руб/кВАгод	C_{II}	36
Время работы системы вентиляции	ч	τ	146
Количество вентиляторов в системе НК-12КВ-1М АВК-35Э		n_1	4
		n_2	2

* — по данным "Средуралнефтебита".

** — по данным "Уралтрансгаз".

Цены 1990 г.

где Z_2 — капитальные затраты на создание системы вентиляции, руб.

Затраты на техобслуживание системы вентиляции при норме отчислений 10 % составят

$$Z_{2.3} = 0.1 \cdot Z_2 \quad (7.11)$$

На основании статистической обработки метеоданных за 1985—1990 гг. установлено, что возможная суммарная продолжительность периода естественного воздухообмена для района Лебедевского, Михайловского и Стойленского карьеров, соответственно, составляет 225, 224 и 240 часов в год.

Результаты расчета экономического эффекта и технико-экономические показатели карьеров приведены в таблице 7.5 и свидетельствуют о преимуществе газотурбинного привода. При расчете сравнивались технико-экономические показатели карьеров при использовании различных типов привода рабочего органа карьерных вентиляторов с газовым приводом — без применения систем искусственной вентиляции.

Для карьера "Муромец" приведены расчеты затрат для вариантов эксплуатации карьерных вентиляторов с газотурбинным приводом с использованием авиационного керосина, природного газа на единицу и использованием электропривода для всех вентиляторов системы I очереди с газотурбинным приводом четыре вентилятора II-III-IV с использованием авиационного керосина и двух вентиляторов АКВ-35Э с электроприводом. Итоговые данные по расчету приведены в табл. 7.6.

Приведены расчеты по всем вариантам привода вентиляционных расхонов в части энергетической эффективности и т. д., для сравнения с другими вариантами (табл. 7.6) по величине используемой энергии.

1. Газотурбинный привод всех вентиляторов с использованием авиационного керосина

$$C_1 = \frac{C_{г1} - C_{г2}}{2} (\pi_{г1} - \pi_{г2}) =$$

$$= \frac{0,078 - 0,077}{2} (1300 - 2 - 2\% \cdot 2 \cdot 123) = 15722 \frac{Руб}{103}$$

2. Газотурбинный привод четырех вентиляторов НК-12КВ-1М с использованием керосина и двух вентиляторов АВК-35Э с электроприводом:

$$C_2 = \frac{0,078 + 0,077}{2} \cdot 143 \left(2300 \cdot 4 + 5882 \cdot 2 \left(0,01 + \frac{36}{143} \right) \right) =$$

$$= 440775 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

3. Электрический привод всех вентиляторов:

$$C_3 = (N_1 n_1 + N_2 n_2) \tau \left(C_3 + \frac{C_y}{\tau} \right) =$$

$$= (6431 \cdot 4 + 5888 \cdot 2) \cdot 143 \cdot \left(0,01 + \frac{36}{143} \right) = 1403625 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

4. Газотурбинный привод всех вентиляторов с использованием природного газа:

$$C_4 = 10^{-3} (m_1 n_1 + m_2 n_2) \frac{q_k}{q_2 P_2} C_2 \tau =$$

$$= 10^{-3} (2300 \cdot 4 + 2496 \cdot 2) \cdot \frac{43000}{34150 \cdot 0,733} \cdot 18 \cdot 143 = 62757 \frac{\text{руб}}{\text{год}}$$

Из расчета следует, что предпочтение следует отдать газотурбинному приводу всех вентиляторов с использованием природного газа.

7.4. Сравнительная оценка экономических показателей систем нормализации условий труда в карьерах

Предложенные КФАН СССР системы автономного воздухообеспечения рабочих в карьерах [241] нельзя рассматривать в качестве альтернативы средствам пылегазоподавления на базе вентиляторов-оросителей [149, 170]. Во-первых, эти системы не решают экологической проблемы как для горнорабочих вспомогательных профессий в карьере, так и для окружа-

ющего воздушного бассейна, поскольку не обеспечивают очистки воздуха в атмосфере карьера и подавление вредных примесей у источников их образования. Во-вторых, для таких систем необходимо создавать отдельное компрессорное хозяйство, требующее значительных капитальных затрат, соизмеримых с затратами при внедрении средств всесезонного пылегазоподавления. По расчетам КФАН СССР, только по трем карьерам Кольского полуострова капитальные затраты составят более 4 млн руб. (в ценах 1990 г.). В-третьих, предлагаемые в системах индивидуальные шлемофоны с поддувом воздуха не смогут обеспечить нормальных эргономических показателей и приведут к снижению производительности труда. Более перспективным, по нашему мнению, представляется внедрение разработанных Челябинским тракторным заводом систем пылегазоочистки (СПГО-1), обеспечивающих очистку поступающих в кабины воздуха от вредных примесей. Однако и эти системы не решают проблему защиты окружающей среды от вредных выбросов при производстве открытых горных работ.

Комплексное решение экологической проблемы должно предусматривать подавление вредных примесей у источников их образования, внедрение ЦПТ, систем пылегазоочистки и активное подавление вредных примесей в атмосфере карьеров с помощью генераторов осадков на базе вентиляторов-оросителей [149].

Исходя из этого, нами выполнен расчет экономического эффекта с учетом ликвидации ущерба от простоев карьера и ущерба от загрязнения окружающей среды вредными выбросами. Величину эффекта можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E} = Y_n \cdot P_0 + Y_z \cdot P_1 - (E_n \cdot Z_k + Z_3), \quad (7.12)$$

где Y_n — величина ущерба от простоев карьера при неблагоприятных метеоусловиях, руб.;

P_0 — надежность системы по предотвращению простоев;

P_1 — надежность системы по пылегазоподавлению в атмосфере карьера;

Y_z — ущерб, наносимый народному хозяйству вследствие загрязнения окружающей среды, руб.;

$E_n = 0,12$ — нормативный коэффициент;

Z_k — капитальные затраты на внедрение системы, руб.;

Z_3 — эксплуатационные расходы на систему, руб.

Значение Y_n можно рассчитать по формуле

$$Y_n = C_n \frac{T_n}{T_p} \cdot A, \quad (7.13)$$

где C_n — доля условно-постоянных расходов в себестоимости 1 т горной массы, руб/т;

T_n — время простоя карьера вследствие загрязнения окружающей среды, ч/год;

T_p — режимный фонд рабочего времени, ч/год;

A — годовая производительность карьера по горной массе, т.

Второе слагаемое в формуле (7.12) представляет собой предотвращенный ущерб от загрязнения окружающей среды. Если к примеру, рекомендуемая КФАН СССР система автономного воздухообеспечения рабочих мест не обеспечивает активного подавления вредных примесей, то $P_1 = 0$.

При одинаковой надежности различных систем по предотвращению простоев карьеров ($P_0 = idem$) сравнение их эффективности можно проводить по формуле

$$\mathcal{E} = Y_1 P_1 - (E_n + Z_k + Z_3), \quad (7.14)$$

где $P = P_{10} - P_{11}$;

$$Z = Z_{к0} - Z_{к1}.$$

индекс "б" относится к базовому варианту, например — система пылегазоподавления на базе вентиляторов-оросителей; индекс "1" — к системе автономного воздухообеспечения.

Система пылегазоподавления для карьера "Мурунтау" включает четыре НК-12КВ-1М. Система автономного воздухообеспечения включает 120 комплектов индивидуального назначения на 1000 рабочих и необходимое для их обслуживания оборудование — баллоны с воздухом, редукторы, калориферы, компрессоры, шлемы, аппаратуру автоматизации расхода воздуха и компрессоров.

При $C_n = 0,17$; $T_n = 500$ ч, $T_p = 6050$ и $A = 40 \cdot 10^6$ т/год величина ущерба, наносимого загрязнением окружающей среды, составит 575 тыс. руб/год.

При расчетах по формуле (7.12) примем $P_{10} = 0,85$; $P_{11} = 0$. Расчеты затрат (в ценах 1990 г.) по обоим вариантам:

	Вариант "б"	Вариант "1"
Капитальные расходы, тыс. руб	823	1082
Эксплуатационные расходы, тыс. руб	30	154
Всего	1053	1236

В результате расчетов по формуле (7.12) установлено, что система активного пылегазоподавления эффективнее системы автономного воздухообеспечения на 586 тысяч рублей.

Внедрение системы пылегазоподавления на карьере ПГХК позволило ликвидировать простой горно-транспортного оборудования и получить экономический эффект в размере 153 тыс. руб. без учета сокращения ущерба, наносимого окружающей среде.

Расчеты технико-экономических показателей, выполненные для карьера "Мурунтау", показали, что при внедрении системы вентиляции и пылегазоподавления, состоящей из четырех вентиляторов-оросителей НК-12КВ-1М и двух вентиляторов АВК-35, а также 70 комплектов системы снижения токсичности отработавших газов, может быть снижен годовой ущерб, наносимый окружающей среде, на трех этапах отработки карьера до глубины 300, 400 и 600 м, соответственно, на 482000, 746000 и 184000 руб. в ценах 1990 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшими климатообразующими факторами, определяющими состояние атмосферы карьеров, являются радиационный и ветровой режимы районов расположения, а также синоптическая обстановка. По мере увеличения глубины отработки на радиационный баланс в атмосфере карьеров существенное влияние оказывают горно-геологические факторы — форма карьеров, географическая ориентация большой оси, свойства горных пород, в частности, способность поглощать солнечную энергию, выделять токсичные газы; формирование задерживающих слоев, а также технологические факторы — интенсивность выделения пыли и газов при работе оборудования. В наиболее неблагоприятных условиях по количеству штилевых периодов находятся карьеры, расположенные на Северо-Западе России (1650 часов) и Якутии (2720 часов).

Многообразие и специфика источников пылегазовыделений предопределяет системный комплексный подход к решению проблемы нормализации атмосферы карьеров. При этом основными задачами систем вентиляции и пылегазоподавления должны быть связывание вредных примесей в пределах выработанного пространства карьера, предотвращение загрязнения окружающей среды. Наиболее приемлемой с точки зрения стоимости, доступности и эффективности снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей всех типоразмеров карьерных автосамосвалов является система выпуска ОГ через перевозимую горную массу.

Перспективными с экологической точки зрения являются предложения по интенсификации естественного воздухообмена, предусматривающие очистку входящего и исходящего из карьера воздуха путем устройства в проранах между отвалами водяных или паровых завес. Способы и средства локализации выбросов вредных примесей, автономные и индивидуальные средства защиты не решают полностью задач нормализации атмосферы карьера и предотвращения загрязнения окружающей среды. В этой связи целесообразно использовать мощные средства искусственной вентиляции и пылегазоподавления. Вентиляция в "чистом" виде должна применяться только в исключительных случаях.

На основании аналитических и экспериментальных исследований доказана техническая и эколого-экономическая целесообразность применения турбовинтовых двигателей для создания

средств вентиляции и пылегазоподавления и разработаны конструктивные элементы карьерных вентиляторов, позволившие в значительной мере улучшить эксплуатационные, аэродинамические и гигиенические показатели. Разработан типажный ряд карьерных вентиляторов, адаптированных к современным условиям горного производства. В состав типажного ряда должны входить следующие установки:

— мобильные вентиляторы-оросители многоцелевого назначения с дизельным и дизель-электрическим приводом;

— мобильные вентиляторы с дизель-электрическим приводом на базе вертолетных несущих винтов со складывающимися лопастями (вертолеты серии "Ка") для проветривания воронкообразных карьеров и застойных зон восходящими и наклонными струями;

— передвижные вентиляторы большой производительности на базе несущих вертолетных винтов и вентиляторных групп с электрическим и газотурбинным приводом;

— передвижные вентиляторы-оросители на базе турбовинтовых двигателей. Вентиляторы на базе несущих винтов вертолетов должны комплектоваться воздухоочистительными экранами, устанавливаемыми со стороны подтекания воздуха под винт.

Опытные образцы карьерных вентиляторов-оросителей АИ-20КВ, НК-12КВ-1М, УМП-14, УМП-21 были испытаны на карьерах Гороблагодатского РУ, Соколовско-Сарбайского ГОКа, комбината "Ураласбест", предприятия "Висмут" в ГДР, ПО "Апатит", комбината "Магнезит" и др. Созданные системы вентиляции и пылегазоподавления позволили нормализовать атмосферу и отработать запасы руды на нижних горизонтах уранодобывающих карьеров, отработать технологию пылегазоподавления при отрицательных температурах.

Для обеспечения экономичной и эффективной работы систем вентиляции и пылегазоподавления обязательным их элементом должны быть системы оперативного контроля метеорологических и гигиенических параметров атмосферы карьера. Исследования с использованием систем контроля "Диспетчер-1" и "Диспетчер-2" на карьерах НГМК и комбината "Магнезит" позволили разработать рекомендации для внедрения универсальной системы предупреждения о техногенных загрязнениях на основе газоаналитических модулей, встроенных в таксофоны "Орех". Системы обеспечивают:

— непрерывное измерение концентрации взрывоопасных и токсичных компонентов воздушной среды территорий и объектов, на которых установлены таксофоны;

— передачу информации о загрязнении воздушной среды по сетям АТС всех поколений, включая современные цифровые и тональные АТС:

— возможность передачи информации по радиоканалу;

— непрерывную работу без обслуживания в течение года при температуре от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$;

— автоматическую диагностику технического состояния газоаналитического модуля;

— устойчивость к преднамеренным или непреднамеренным повреждениям, в том числе ударам, выстрелам дробью, ветровым и климатическим нагрузкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бересневич П. В., Лобода А. И. Способы и средства борьбы с вредными газами в железорудных карьерах // Черная металлургия: Бюл. НТИ.— 1991.— № 3.— С. 4—13.

2. Бересневич П. В., Лобода А. И., Ребристый В. Н. Прогноз способов и средств нормализации атмосферы глубоких карьеров методом экспертной оценки // Горн. журн.— 1990.— № 8.— С. 52—55.

3. Update on Belt Cleaners // Rock Products.— 1988.— Vol. 91.— N 3.— P. 45—49.

4. Бересневич П. В., Наливайко В. Г. Снижение выбросов пыли и газов в атмосферу карьеров и окружающую среду при массовых взрывах: Черметинформация.— М.— 1989.— 23 с.— (Сер. Горнорудное производство. Вып. № 4).

5. Бересневич П. В., Наливайко В. Г. Сокращение вредных выбросов в атмосферу Кривбасса при массовых взрывах в карьерах // Всесоюз. науч. семинар по безопасности на открытых горных работах. (Кривой Рог. 16—18 октября 1990): Тез. докл.— 1990.— С. 8—9.

6. Борьба с запыленностью и загазованностью карьеров / Филатов С. С., Коноров М. М., Подвысоцкий К. С. и др. // Безопасность труда в пром-сти.— 1989.— № 9.— С. 46—49.

7. Подвысоцкий К. С., Моор А. А., Еремеев В. И. Пенное экранирование для пыле-газо-шумопоглощения при массовых взрывах // Безопасность труда в пром-ти.— 1988.— № 9.— С. 52—53.

8. Ткачук К. К. Методы снижения загрязнения воздушной среды при разрушении // Всесоюз. науч.-техн. семинар по безопасности на открытых горных работах (Кривой Рог. 16—18 октября 1990): Тез. докл.— М., 1990.— С. 14—15.

9. Борзенков П. А., Семунькин М. Б. Применение ПАВ для пылеподавления при массовых взрывах в карьерах // Всесоюз. науч.-техн. семинар по безопасности на открытых горных работах (Кривой Рог. 16—18 октября 1990): Тез. докл.— М., 1990.— С. 12—13.

10. Ткаченко Н. Г. Применение для борьбы с пылью экологически чистых реагентов // Эффективные технологии, способы и средства, обеспечивающие современные требования к экологии при разработке месторождений полезных ископаемых (Москва, август 1990): Тез. докл. конф. / ИГД Минмета СССР — М.: Черметинформация, 1990.— С. 118.

11. Филатов С. С. Нормализация состава атмосферы в глубоких карьерах // Горн. журн.— 1987.— № 2.— С. 35—37.

12. Проблемы и нормализация атмосферы на открытых горных работах отрасли / Мосинец В. Н., Лукьянов А. Н., Аверкин Л. А., Коноров М. М. // Горн. журн.— 1991.— № 1.— С. 48—52.

13. Коноров М. М. Новые способы снижения токсичности отработавших газов двигателей карьерных автосамосвалов // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): Докл. Междунар. конф. (6—10 июля 1998 г.): В 4 т: Т. 1.— Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1998.— С. 324—332.

14. А. с. 244811 СССР, МКИ 5 F 01 N 3/00. Термокаталитический нейтрализатор / Филатов С. С., Коноров М. М. (СССР).— № 1168258/24—6; Заяв. 19.06.67; Опубл. 28.05.69, Бюл. изобр.— 1969.— № 18.— С. 147.

15. Патент Англии № 1270782, 1970 г. / Филатов С. С., Коноров М. М. по а. с. 244811.

16. Патент Бельгии № 746749, 1970 / Филатов С. С., Коноров М. М. по а. с. 244811.

17. Патент ФРГ № 2004909, 1971 / Филатов С. С., Конорев М. М. по а. с. 244811.
18. Патент Канады № 899635, 1972 / Филатов С. С., Конорев М. М. по а. с. 244811.
19. Патент США № 3669630, 1972 / Филатов С. С., Конорев М. М. по а. с. 244811.
20. Жегалин О. И., Френкель А. И., Сайкин А. М. Снижение токсичности отработавших газов двигателей // Промышленный транспорт.— 1978.— № 5.— С. 26—28.
21. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / Жегалин О. И., Панчишный В. И., Сайкин А. М. и др.— М.: Машиностроение, 1979.— 80 с.
22. Сайкин А. М. Системы очистки отработавших газов автосамосвала БелАЗ-540А // Автомобильный транспорт.— 1976.— № 3.— С. 31—33.
23. Френкель А. И., Тимофеевский А. А., Сайкин А. М. Каталитические дельные нейтрализаторы НКР-241 // Безопасность труда в пром-ти.— 1976.— № 3.— С. 29—30.
24. А. с. 495444 СССР, МКИ 2 О1F 3/14, В 01 9/08. Нейтрализатор отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Афанасьев К. М., Филатов С. С. (СССР).— № 2044574/24-6. Заяв. 12.07.74. Оpubл. 15.12.75, Бюл. изобр. 1975.— № 46.
25. Жегалин О. И., Луначев П. Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей.— М.: Транспорт, 1985.— 120 с.
26. А. с. 490495 СССР, МКИ 2 В 01 9/20, 01 3/14. Устройство с кипящим слоем катализатора / Филатов С. С., Афанасьев К. М. (СССР).— № 1769090/24—6; Заяв. 07.04.72; Оpubл. 05.11.75, Бюл. изобр. 1975.— № 41.— С. 22.
27. А. с. 547534 СССР, МКИ 3 О1F 3/15. Нейтрализатор отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Афанасьев К. М. (СССР).— № 21 2549/06; Заяв. 12.09.75; Оpubл. 25.02.77, Бюл. изобр. 1977.— № 7.
28. А. с. 590467 СССР, МКИ 3 F 01 N 3/15, В 01 jв 8/02. Нейтрализатор отработавших газов для двигателя внутреннего сгорания / Филатов С. С., Афанасьев К. М. (СССР).— № 2159818/25—06; Заяв. 23.07.76; Оpubл. 30.01.78, Бюл. изобр. 1978.— № 4.
29. Haffingen U. Sticstaffoxid-Ausstob reduzieren Sinsatzeines thermischen Reaktors zur Verringerang der Schadstoffennission vor reerbrennungs-motoren // Vi-Nach-Mchten.— 1976.— Bd. 30.— N 16.— S. 315.
30. Ove Rehuberg. What are constituents of exharst from underground Diesel truche? // World mining.— 1976.— Vol. 29.— P. 42—45.
31. А. с. 1024311 СССР, МКИ 3 В 60 Н 1/00, В 62 D 33/00. Транспортное средство для перевозки горной массы / Смайлс В. Н., Куров В. М., Новиков Л. А., Юшков В. Б., Михеев А. В. (СССР).— № 3359853/27—11; Заяв. 30.02.81; Оpubл. 23.06.83, Бюл. изобр.— 1983.— № 23.
32. А. с. 1257010 СССР, МКИ 4 В 62D 33/00, F 01 N 3/00. Грузовой кузов для перевозки горной массы транспортного средства с двигателями внутреннего сгорания / Афанасьев К. М., Филатов С. С., Конорев М. М., Блонский М. В., Росляков С. М., Кленко А. А. (СССР).— № 3872539/27—11; Заяв. 25.03.85; Оpubл. 15.09.86, Бюл. изобр. 1986.— № 34.
33. А. с. 1382677 СССР, МКИ 4 В 60 K 13/04, В 62 D 33/00, F 01 N 3/00. Грузовой кузов для перевозки горной массы транспортного средства с двигателем внутреннего сгорания / Афанасьев К. М., Филатов С. С., Конорев М. М., Блон-

ский М. В., Крючков В. Н. (СССР).— № 4050246/22—11; Заяв. 04.04.86; Оpubл. 23.03.88, Бюл. изобр.— 1988.— № 11.

34. А. с. 1564003 СССР, МКИ 5 В 62 D 33/00, F 01 N 3/00. Грузовой кузов для перевозки горной массы транспортного средства с двигателем внутреннего сгорания / Афанасьев К. М., Кленко А. А., Конорев М. М., Подвысоцкий К. С., Моор А. А. (СССР).— № 4496810/27—11; Заяв. 17.10.88; Оpubл. 15.05.90, Бюл. изобр.— 1990.— № 18.— С. 279.

35. Афанасьев К. М. Разработка устройства для обезвреживания отработавших газов // Горн. журн.— 1988.— № 4.— С. 57—59.

36. Гагауз Ф. Г. Исследование и изыскание способов борьбы с пылью и ядовитыми газами при ведении взрывных работ: Дис. ... канд. техн. наук. / НИИ рудвентиляция.— Кривой Рог, 1965.— 163 с.

37. Казарез А. Н., Кулеинов А. А. Эксплуатация карьерных автосамосвалов с электромеханической трансмиссией.— М.: Недра, 1988.— 264 с.

38. Еремеев В. И., Бреус Т. Н. Исследование зависимости загрязнения атмосферы карьера "Миц" от вертикального градиента температуры // Профилактика травматизма и борьба с профессиональными вредностями в цветной металлургии / ЦНИИПП.— Свердловск, 1988.— С. 86—90.

39. Росляков С. М. Обоснование рациональных параметров систем вентиляции карьеров с использованием струйных установок и открытых водосборников: Дис. ... канд. техн. наук / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1986.— 220 с.

40. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров.— М.: Госгортехиздат, 1963.— 252 с.

41. Вершинин А. А. Об энергетической оценке воздухообмена в карьерах // Воздухообмен и микроклимат в карьерах: Сб. тр. / НИИОГР.— Челябинск, 1969.— С. 45—51.

42. А. с. 264310 СССР, МКИ 2 Е 21 Г 100. Способ проветривания карьеров / Бухман Я. З., Белоусов В. И. (СССР).— № 1143811/22—3; Заяв. 20.03.67; Оpubл. 03.03.70, Бюл. изобр.— 1970.— № 9.

43. А. с. 985314 СССР, МКИ 3 Е 21 F 1/00. Способ проветривания карьера / Белоусов В. И., Селезнев В. Н. (СССР).— Заяв. 10.07.81; Оpubл. 30.12.82, Бюл. изобр.— 1982.— № 48.— С. 138.

44. А. с. 1035236 СССР, МКИ 3 Е 21 F 1/00. Способ вентиляции глубоких карьеров / Битколов Н. З., Иванов И. И., Никитин В. С. (СССР).— № 3415162/22—03; Заяв. 17.03.82; Оpubл. 15.08. 83, Бюл. изобр.— 1983.— № 30.— С. 108.

45. А. с. 1162995 СССР, МКИ 4 Е 21 F 1/00. Способ проветривания глубоких карьеров / Каминский Д. А. (СССР).— № 3723103/22—03; Заяв. 10.02.84; Оpubл. 23.06.85, Бюл. изобр.— 1985.— № 23.— С. 123.

46. А. с. 1244339 СССР, МКИ 4 К 21 F 1/00. Способ проветривания нагорных карьеров / Хван В. Е. (СССР).— № 3811772/22—03; Заяв. 11.11.84; Оpubл. 15.07.86, Бюл. изобр.— 1986.— № 26.— С. 145.

47. А. с. 1219820 СССР, МКИ 4 К 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Хван В. Е. (СССР).— № 3829473/22—03; Заяв. 31.10.84; Оpubл. 23.03.86, Бюл. изобр.— 1986.— № 11.— С. 174.

48. А. с. 898093 СССР, МКИ 3 Е 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Фурсов Е. Г., Невзоров А. И., Клубов С. Я., Мозолов А. В. (СССР).— № 2925455/22—03; Заяв. 16.05.80; Оpubл. 15.01.82, Бюл. изобр.— 1982.— № 2.— С. 161.

49. А. с. 1259037 СССР, МКИ 4 Е 21 F 1/00. Способ проветривания глубоких карьеров / Цыганков А. В., Ефремов Е. Т. (СССР).— № 3872216/22—03; Заяв. 25.03.85; Оpubл. 23.09.86, Бюл. изобр.— 1986.— № 35.— С. 143.

50. А. с. 589420 СССР, МКИ 3 Е 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Филатов С. С., Росляков С. М., Павлов А. И. (СССР).— № 2170331/22—03; Заяв. 08.09.75; Оpubл. 25.01.78, Бюл. изобр.— 1978.— № 3.— С. 112.

51. А. С. 1002599 СССР, МКИ 3 Е 21 Г 1/00. Способ проветривания карьеров / Мишин В. Ф., Калабин Г. В. (СССР).— № 3007897/22—03; Заяв. 24.11.80; Оpubл. 07.03.83, Бюл. изобр.— 1983.— № 9.— С. 128.

52. А. с. 1271979 СССР, МКИ 4 Е 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Нестеренко Г. Ф., Макаров В. Н., Терещенко Г. Л., Коноров М. М. (СССР).— № 3701253/22—03; Заяв. 15.02.84; Оpubл. 23.11.86, Бюл. изобр.— 1986.— № 43.

53. А. с. 739244 СССР, МКИ 3 Е 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Павлов А. И., Филатов С. С., Росляков С. М. (СССР).— № 2587030/22—03; Заяв. 20.02.78; Оpubл. 05.06.80, Бюл. изобр.— 1980.— № 21.— С. 180.

54. Кочнев К. М., Филатов С. С. Аэродинамика потоков в карьерах // Труды / ГТИ УФАН СССР.— Свердловск, 1958.— Вып. 31.— С. 245—251.

55. Абрамов Ф. А. К вопросу о проветривании глубоких карьеров // Межобластная науч.-техн. конф. по открытой разработке месторождений Украины: Материалы конф. (Днепропетровск, 1957) — Днепропетровск: ДГИ, 1957.— С. 35—39.

56. Гершун О. С. К вопросу проветривания глубоких карьеров // Изв. ВУЗов.— 1958.— Горн. журн. № 31.— С. 81—87.

57. Кузнецов И. П. Об улучшении труда на открытых горных работах // Изв. ВУЗов. Горн. журн.— 1958.— № 8.— С. 27—31.

58. Битколов Н. З. К вопросу проветривания глубоких карьеров // Изв. ВУЗов. Горн. журн.— 1959.— № 4.— С. 37—42.

59. Фатуев Н. Г. Искусственное проветривание карьеров // Технология и экономика угледобычи.— 1962.— № 8.— С. 38—42.

60. Фидеев Н. Н. О применении вертолетов для проветривания карьеров // Изв. ВУЗов. Горн. журн.— 1960.— № 1.— С. 92—96.

61. Филатов С. С. Пути улучшения атмосферных условий в карьерах с автотранспортом // Основные вопросы развития горнодобывающей промышленности Оренбургского экономического района.— Свердловск-Оренбург: УФАН, 1959.— С. 107—114.

62. Семеновко Б. А., Богаевский О. А., Кибальников В. Г. Проветривание карьера турбореактивным двигателем // Горн. журн.— 1962.— № 1.— С. 42—45.

63. Филатов С. С., Вершинин А. А. Искусственное проветривание карьеров свободными турбулентными струями // Труды / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1964.— Вып. № 10.— С. 67—74.

64. Вершинин А. А., Филатов С. С. О возможности использования несущих винтов вертолетов для проветривания карьеров // Труды / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1964.— Вып. № 10.— С. 84—88.

65. Определение с помощью ЭЦВМ рационального по энергетическим затратам способа искусственного проветривания карьеров / Филатов С. С., Вершинин А. А., Егослава В. Ф. и др. // Физ. техн. пробл. разраб. полез. ископаемых.— 1970.— № 1.— С. 102—109.

66. Филатов С. С., Вершинин А. А., Пивлов А. И., Коноров М. М. Искусственное проветривание карьеров агрегатами пропеллерного типа // Уголь.— 1967.— № 9.— С. 35—37.

67. Установка для вентиляции карьеров вертикальными струями / Филатов С. С., Павлов А. И., Блонский М. В. и др. // Цветная металлургия.— 1971.— № 13.— С. 12—14.

68. Филатов С. С., Блонский М. В. К расчету искусственного проветривания застойных зон в карьерах вертикальными изотермическими струями // Труды / ГГО.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— Вып. 359.— С. 174—181.
69. Павлов А. И., Блонский М. В. Условия применения и технические возможности карьерных вентиляторов с вертолетным винтом // Труды / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1979.— Вып. 58.— С. 94—98.
70. Разработка новых типов карьерных вентиляторных установок / Филатов С. С., Павлов А. И., Коркин Ю. М. и др. // Всесоюз. науч.-техн. конф. по борьбе с пылью и профилактике пневмоконозозов на предприятиях угольной промышленности: Тез. докл. / ЦНИИУголь — М., 1979.— С. 109—111.
71. Куликов В. П., Роголис Ю. П. Проветривание угольных разрезов — М.: Недра, 1979.— 142 с.
72. А. с. 848681 СССР, МКИ 3 E 21 F 1 / 00. Устройство для проветривания карьеров в периоды инверсий / Нестеренко Г. Ф., Филатов С. С., Коноров М. М. (СССР).— № 2797847/22—03; Заяв. 16.07.79; Опубл. 25.07.81, Бюл. изобр.— 1981.— № 27.
73. Шмалько Э. Я. Исследование эффективности местного проветривания на открытых горных работах // Горн. журн.— 1965.— № 8.— С. 71—74.
74. Фатуев Н. Г. Общая загазованность и искусственное проветривание карьеров // Вопросы борьбы с пылью в карьерах: Матер. соещ. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1963.— С. 57—62.
75. Чулаков П. Ч., Ахметов О. Состояние атмосферы Зырянского карьера и пути его улучшения // Вопросы борьбы с пылью в карьерах: Матер. соещ.— М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1963.— С. 33—40.
76. Павлов А. И. Эффективность воздушно-водяной струи оросительно-вентиляторной установки ОВ-2 // Борьба с пылью и газами на карьерах.— Свердловск, ИГД МЧМ СССР, 1970.— С. 84—91.
77. Павлов А. И. К вопросу определения рациональных конструктивных параметров струйных карьерных вентиляторов на базе авиационных винтов // Применение авиадвигателей в газоструйных установках— М.: ОНТЭИ.— 1975.— С. 25—34. (Труды / ГосНИИ ГА. Вып. 113).
78. Павлов А. И. Исследование средств местного проветривания и пылеподавления на открытых горных работах // Борьба с пылью на открытых горных работах. Ч. 1. Состояние атмосферы карьеров и их вентиляция: Материалы совещания (Москва, 1969) — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1970.— С. 55—64.
79. Левин Е. Н., Суслин Ю. В. Выбор выходной части вентиляторной установки для проветривания застойных зон в карьерах // Воздухообмен и микроклимат в карьерах: Труды / НИИОГР — Челябинск, 1969.— С. 137—140.
80. Луговский С. И., Дубенюк В. М. Проветривание карьеров воздушно-водяными струями.— Волгоград: Нижне-Волжское кн. изд-во. 1967.— С. 132.
81. Бухман Я. З., Белоусов В. И., Симаков П. Г. Теория и практика проветривания карьеров свободными неизотермическими струями // Борьба с пылью на открытых горных работах. Ч. 1. Состояние атмосферы карьеров и их вентиляция: Материалы совещания (Москва, 1969) — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1970.— С. 20—24.
82. Гальцев В. Н., Мухин А. А. Конструктивные и эксплуатационные особенности универсальной вентиляторной установки с турбореактивным двигателем РД-3М-500 // Труды / ГосНИИ ГА.— М.: ОНТЭИ.— 1975.— Вып. 113.— С. 48—55.
83. Кочнев К. В., Филатов С. С. К вопросу об улучшении атмосферных условий в глубоких карьерах // Сборник работ по силикозу.— Свердловск: УФАН СССР, 1960.— № 2.— С. 36—41.

84. *Вершинин А. А.* Проветривание карьеров мощным газовым эжектором // Проветривание шахт и карьеров // Труды / ИГД МЧМ СССР — Свердловск, 1964. — Вып. 10. — С. 75—83.

85. *Филатов С. С.* О предотвращении опасных загрязнений атмосферы глубокими карьерами // Горн. журн. — 1979. — № 1. — С. 59—61.

86. Совершенствование параметров карьерных вентиляторов-оросителей НК-12 КВ / *Конорев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф.* и др. // Наземное применение авиадвигателей в народном хозяйстве: Материалы межотраслевой конф. — М.: ВИМИ, 1981. — Ч. 2. — С. 63—70.

87. Установка для пылеподавления и искусственной вентиляции на открытых горных работах на базе турбовинтового двигателя / *Филатов С. С., Вершинин А. А., Конорев М. М., Храмов П. Г.* // Горн. журн. — 1969. — № 3. — С. 13—15.

88. *Конорев М. М., Филатов С. С.* Использование турбовинтовых двигателей для искусственной вентиляции и пылеподавления на открытых горных работах // Борьба с пылью на открытых горных работах. Ч. 1. Состояние атмосферы карьеров и их вентиляция: Материалы совещания (Москва, 1969) — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1970. — С. 55—64.

89. *Конорев М. М.* Результаты опытно-промышленных испытаний карьерного вентилятора на базе турбовинтового двигателя // Борьба с пылью и газами на карьерах: Сб. тр. / ИГД МЧМ СССР. — Свердловск, 1970. — С. 96—105.

90. *Конорев М. М.* Исследование и разработка средств вентиляции карьеров на базе авиационных турбовинтовых двигателей: Дис. ... канд. техн. наук / ИГТМ АН УССР. — Днепропетровск, 1972. — 261 с.

91. *Филатов С. С., Михайлова В. А., Вершинин А. А.* Борьба с пылью и газами на карьерах. — М.: Недра, 1973. — 142 с.

92. Карьерный вентилятор-ороситель НК-12КВ / *Филатов С. С., Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф.* и др. // Горн. журн. — 1973. — № 5. — С. 13—17.

93. *Филатов С. С., Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф.* Результаты опытно-промышленной эксплуатации карьерных вентиляторов на базе турбовинтовых двигателей НК-12 и АИ-20 // Труды / ГосНИИ ГА. — М.: ОНТЭИ. — 1975. — Вып. 113. — С. 17—24.

94. Конструктивные особенности и технико-экономические показатели карьерного вентилятора-оросителя НК-12 КВ-1М / *Филатов С. С., Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф.* и др. // Горн. журн. — 1981. — № 6. — С. 43—46.

95. *Никитин В. С., Битколов Н. З.* Проветривание карьеров. — М.: Недра, 1975. — 254 с.

96. *Битколов Н. З., Зенов С. И.* Изучение и обоснование параметров средств искусственного проветривания карьеров на базе авиационных двигателей // Труды / ГосНИИ ГА. — М.: ОНТЭИ. — 1975. — Вып. 113. — С. 14—16.

97. *Битколов Н. З., Зенов С. И.* Турбокомпрессорный вентилятор для карьеров // Уголь. — 1975. — № 4. — С. 23—24.

98. *Аланов Г. Н., Зенов С. И.* Самоходные установки для проветривания карьеров // Промышленный транспорт. — 1978. — № 4. — С. 24—26.

99. *Вульфсон Н. И., Кондратова А. В.* Воздействие на кучевые облака искусственными вертикальными струями // Метеорология и гидрология. — 1968. — № 9. — С. 22—27.

100. *Быховский А. В., Козаков Л. А.* Об активных воздействиях на атмосферу для борьбы с локальными загрязнениями // Гигиена и санитария. — 1966. — № 3. — С. 40—45.

101. Васильев М. В., Филатов С. С., Вершинин А. А. О пылегазоподавлении и искусственном проветривании на открытых горных работах // Горн. журн.— 1967.— № 7.— С. 31—36.

102. Вентиляция глубоких разрезов тепловым способом / Кунин В. Н., Матвеев Г. И., ...— М.: ЦНИИЭ уголь, 1972.— 25с.

103. Ецин Б. Ф., Корогодский Ш. А. Искусственное проветривание карьеров конвективными струями // Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах: Материалы Всесоюз. совещ. (27—30 сентября 1971 г., Ленинград) / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— С. 108—114.

104. А. с. 589421 СССР, МКИ 2 E 21 F 1/00. Установка для проветривания карьеров / Азаров В. С., Вордий А. П., Верба В. Н., Нестеренко В. И. (СССР).— № 2330279; Заяв. 04.03.76; Опубл. 25.01.78, Бюл. изобр. 1978.— № 3.

105. Вершинин А. А. Математическое описание процесса искусственного проветривания карьеров свободными турбулентными струями // Борьба с пылью и газами на карьерах: Сб. тр. / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1970.— Вып. 24.— С. 114—117.

106. Козаков Л. А. Учет влияния распределения примесей на эффективность искусственного проветривания карьеров // Труды / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1972.— Вып. 294.— С. 64—72.

107. Вершинин А. А. Сравнительная оценка схем искусственного проветривания карьеров // Физ.-тех. пробл. разработки полезн. ископаемых.— 1976.— № 1.— С. 76—80.

108. Филатов С. С., Вершинин А. А. Об особенностях физического моделирования тепловентиляционных и пылевых процессов // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов.— Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1977.— С. 91—96.

109. Радченко Г. А., Вазилло В. Н. Вопросы физического моделирования устойчивой температурной стратификации в карьерах // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов.— Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1977.— С. 101—105.

110. Козаков Л. А., Макаров В. А. Численные решения уравнения диффузии для оценки изменения концентрации загрязняющих газов при естественном и искусственном проветривании карьеров // Труды / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— Вып. 359.— С. 252—256.

111. Блонский М. В. К расчету параметров струй карьерных вентиляторов в стратифицированной атмосфере // Физ.-техн. пробл. управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тез. докл. второй научн.-техн. конф. (г. Коктла-Ярве, 1979) — Таллин, 1979.— С. 127—129.

112. Филатов С. С. К обоснованию рациональных режимов эксплуатации карьерных вентиляторов // Глубокие карьеры: Материалы Второго Всесоюз. науч.-техн. совещ.— Киев: Наукова думка, 1973.— С. 229—233.

113. А. с. 859648 СССР, МКИ 3 E 21 F 1/00. Способ проветривания карьеров / Конорев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф., Макаров В. Н. (СССР).— № 2402125; Заяв. 01.09.76; Опубл. 30.08.81, Бюл. изобр.— 1981.— № 32.

114. Проектирование вентиляции разреза "Восточный" производственного объединения "Экибастузуголь" с учетом последних достижений в области аэрологии карьеров / Ушаков К. З., Сялаев В. В., Гармаш А. Н. и др. // Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тез. докл. второй научн.-тех. конф. (г. Коктла-Ярве, 1979) — Таллин, 1979.— С. 67—69.

115. Гуль Ю. В., Мустель П. И. Анализ перспективности существующих способов активного воздействия на атмосферу карьерных пространств с привлечением мнений специалистов // Вентиляция шахт и рудников: Межвуз. сб. ЛПИ.— Л., 1975.— Вып. 2.— С. 121—125.

116. Степанов В. В., Сагимбиева Г. М. Способ динамического воздействия на атмосферу веерным вентиляционным потоком в протяженных выработках // Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тез. докл. второй науч.-техн. конф. (г. Коктла-Ярве, 1979) — Таллин, 1979.— С. 109—111.

117. Никитин В. С. Исследование эффективности искусственного и естественного проветривания разрезов // Уголь.— 1972.— № 1.— С. 26—29.

118. Козай М. П., Никитин В. С. Оценка и сравнение эффективности искусственной вентиляции и естественного проветривания карьеров и траншей // Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах: Материалы Всесоюз. совещ. (Ленинград, 1971) — / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— С. 151—158.

119. Драгунский О. Н. Исследование разрушения инверсий в карьерах: Дис. ... канд. техн. наук / МГИ.— М., 1978.— 141 с.

120. Филатов С. С. К расчету эффективности искусственного и естественного проветривания карьеров // Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах: Материалы Всесоюз. совещ. (Ленинград, 1971) — ГГО — Л.: Гидрометеиздат, 1974.— С. 108—113.

121. Левин Е. М., Суслин Ю. В., Пак В. В. Исследование эффективности использования авиационных винтов в карьерных вентиляторных установках // Труды / ИГМТК им. М. М. Федорова — М., 1966.— № 43.— С. 57—62.

122. Производственный эксперимент по оздоровлению атмосферы карьера "Мир" и прилегающего воздушного бассейна при отрицательных температурах / Муравейник В. И., Прудников В. К., Кузнецов В. Г. и др. // Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: Тез. докл. второй науч. техн. конф. (г. Коктла-Ярве, 1979) — Таллин, 1979.— С. 187—189.

123. Основные принципы полупроводниковых газовых датчиков / Сойто С. и др. — Секубай, 1983.— Т. 26.— № 6.— С. 431—437.

124. Автоматизированные системы для охраны окружающей среды: Доклад фирмы Fest — Alpine Industrieanlagenbau GmbH на научно-техническом симпозиуме выставки "Автоматизация-89" (октябрь 1989).

125. Пат. 4698314, США, приор. Япония, МКИ № 21/47, СО 33/20, НКИ 436/171. Jaon.— Method for measurement of gas concentration.

126. J. Unwion, P. T. Walsh — Sensor and Actuators. Optic Letters, 1989.— Vol. 17.— N 3—4.— P. 575—581.

127. Nelson R. L. Proceedings of the air pollution control association annyal meeting.— Detroit, 1985.— P. 1—16.

128. Torvela A., Kemia Komi: 1987.— Vol. 14.— N 6.— P. 533—534.

129. Sirkky K.— Sbornik — Fizika — materialu a meriutechnika, Praha.— 1985.— N 8.— С. 145—184.

130. Narayanaswamy R.— Contr. Capteurs, 86, Technol. Et Appl., Paris, 17—18 Juni, 1986.— Paris, 1986.— P. 210—214.

131. Dakin J. P., Groydon W. F. Proceeding of the European firbe, optic. Communications and local area networks, 1988.— P. 238—239.

132. Gruliani J. F. Optic Letters, 1983.— Vol. 8.— P. 54—56.

133. Toshida Jutara.— J. Jap. Soc. Safety Eng, 1989.— V. 28.— N 1.— P. 36—

134. Опасности применения газов в технологическом процессе *подушки* водных элементов: — Доклад на симпозиуме фирмы Kiken (Япония, 1981).
135. Индивидуальный прибор для измерения запыленности воздуха — М.: Черметинформация. 1988. — С. 1—3 (Сер. Горнорудное производство, 183).
136. Раскин И. А. Новые вентиляторы для проветривания шварт // *Безопасность труда в промышленности.* — 1970. — № 1.
137. Вершинин А. А., Филатов С. С., Павлов А. И. Анализ возможности использования авиационных воздушных винтов и качества рабочих органов карьерных вентиляторов // *Борьба с пылью и газами на карьерах.* — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970. — С. 37—42.
138. Вершинин А. А., Павлов А. И. Результаты исследований аэродинамических параметров турбулентных струй, создаваемых воздушными винтами, и влияние на эти параметры некоторых конструктивных элементов винтов // *Борьба с пылью и газами на карьерах.* — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970. — С. 48—55.
139. Павлов А. И. Основные закономерности течения полуограниченных струй, создаваемых винтами. Влияние шероховатой поверхности // *Борьба с пылью и газами на карьерах.* — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970. — С. 55—66.
140. Павлов А. И., Вершинин А. А., Филатов С. С. Влияние высоты подвеса винта относительно плоской поверхности на параметры создаваемой им струи // *Борьба с пылью и газами на карьерах.* — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970. — С. 66—78.
141. Самоходная оросительно-вентиляционная установка для открытых горных работ / Филатов С. С., Вершинин А. А., Павлов А. И. и др. // *Горн. журн.* — 1967. — № 2. — С. 72—76.
142. Искусственное проветривание карьеров агрегатами пропеллерного типа / Филатов С. С., Вершинин А. А., Павлов А. И., Коноров М. М. // *Уголь.* — 1967. — № 9. — С. 35—37.
143. Филатов С. С., Вершинин А. А., Павлов А. И. Оросительно-вентиляционные установки в карьере // *Безопасность труда в промышленности.* — 1968. — № 7. — С. 39—43.
144. Филатов С. С., Павлов А. И., Волков В. С. Оросительно-вентиляционная установка ОВ-3 // *Борьба с пылью и газами на карьерах.* — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970. — С. 21—26.
145. Максимов Н. А., Секистов В. А. Двигатели самолетов и вертолетов // *Основы устройства и летной эксплуатации.* — М.: Военное изд-во Министерства обороны, 1977. — 360 с.
146. Кулагин И. И. Основы теории авиационных газотурбинных двигателей. — М.: Военное изд-во Министерства обороны, 1967. — 342 с.
147. Казанджан П. К., Кузнецов А. В. Турбовинтовые двигатели // *Рабочий процесс и эксплуатационные характеристики.* — М.: Военное изд-во Министерства обороны, 1961. — 342 с.
148. А. с. 1023106 СССР, МКИ Е 21 F 1/08. Карьерный турбовентилятор / Коноров М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. (СССР). — № 3384827; Заяв. 23.12.81; Оpubл. 15.06.83, Бюл. изобр. 1983. — № 22.
149. Совершенствование параметров карьерных вентиляторов-оросителей НК-12 КВ / Коноров М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. и др. // *Наземное применение авиадвигателей в народном хозяйстве: Материалы межотраслевой научно-технической конференции.* — М.: ВИМИ, 1981. — Ч. 2. — С. 63—70.

150. Ушаков К. А., Брусилонский И. В., Бушель И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкции.— М.: Госгортехиздат, 1960.— 422 с.

151. Шайдаков В. И. Аэродинамические исследования системы "Винт в кольце" на режиме висения // Труды / МАИ.— М., 1959.— Вып. 111.— С. 41—47.

152. Шайдаков В. И. Влияние глубины расположения винта в кольце на аэродинамические характеристики для режима работы на месте // Изв. ВУЗов. Авиационная техника.— 1960.— № 2.— С. 22—28.

153. Дональд М. и др. Экспериментальные исследования воздушного винта в насадке. Shrouded propellers — A comprehensive berfor Mause. Study. Donald M., Black et al. AIAA Paper, 1968, N. 994.— P. 1—20.

154. А. с. 1195014 СССР, МКИ Е 21 F 1/08. Карьерный турбовентилятор / Коноров М. М., Нестеренко Г. Ф., Филатов С. С. и др. (СССР).— № 3756646; Заяв. 19.03.84; Оpubл. 30.11.85, Бюл. изобр. 1985.— № 44.

155. Гримитлин М. И. Вертикальные сильно неизометрические струи // Теория и расчет вентиляционных струй: Сб. трудов / ВНИИ охраны труда ВЦСПС.— М., 1969.

156. Талиев В. И. Аэродинамика вентиляции.— М.: Госстройиздат, 1963.— 253 с.

157. Абрамович Г. И. Теория турбулентных струй.— М.: Изд-во физико-математической литературы, 1960.— 715 с.

158. А. с. 346486 СССР МКИ Е 21С 47/00. Карьерный турбовентилятор / Филатов С. С., Коноров М. М. (СССР).— № 1468518; Заяв. 16.09.70; Оpubл. 28.07.72, Бюл. изобр.— 1972.— № 23.

159. А. с. 346487 СССР МКИ Е 21 С 47/00, Е21 F 5/00. Способ проветривания карьеров / Филатов С. С., Коноров М. М. (СССР).— № 1468519; Заяв. 16.09.70; Оpubл. 28.07.72, Бюл. изобр.— 1972.— № 23.

160. А. с. 606389 СССР МКИ 2 Е21 F 1/00, Е21 F 1/08. / Филатов С. С., Коноров М. М., Нестеренко Г. Ф., Храмов П. Г. (СССР).— № 1986086; Заяв. 11.01.74; Оpubл. 13.01.78, Бюл. изобр.— 1978.— № 15.

161. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции.— М.: Профиздат, 1965.— 608 с.

162. Филатов С. С. К решению проблемы загрязнения атмосферы при массовых взрывах в глубоких карьерах // Разработка глубоких горизонтов карьеров: Материалы III Всесоюзн. науч.-техн. совещ.— Киев: Наукова думка, 1977.— С. 133—136.

163. Ушаков К. Э., Михайлов В. А. Аэрология карьеров.— М.: Недра, 1975—248 с.

164. Михайлов В. А., Бересневич Н. В. Снижение запыленности и загазованности воздуха на открытых горных работах.— Киев: Техника, 1975.— 116 с.

165. Абрамов Ф. А., Новиков Е. Е., Шинковский В. А. Методы и средства оздоровления атмосферы карьеров // Глубокие карьеры: Материалы первого Всесоюзн. науч.-техн. совещ. по проблемам разработки глубоких горизонтов карьеров.— Киев: Наукова думка, 1970.— С. 353—363.

166. Филатов С. С. О путях интенсификации воздухообмена в глубоких карьерах // Глубокие карьеры: Материалы первого Всесоюзн. науч.-техн. совещания по проблемам разработки глубоких горизонтов карьеров.— Киев: Наукова думка, 1970.— С. 331—342.

167. Филатов С. С., Храмов П. Г. О разработке средств искусственной вентиляции карьеров // Борьба с пылью и газами на карьерах.— Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970.— С. 78—83.

168. *Вершинин А. А., Филатов С. С., Павлов А. И.* Анализ возможности использования авиационных воздушных винтов в качестве рабочих органов карьерных вентиляторов // *Борьба с пылью и газами на карьерах.*— Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970.— С. 37—41.
169. *Шерлыгин Н. А., Шахвердов Н. Г.* Конструкция и эксплуатация авиационных газотурбинных двигателей.— М.: Машиностроение, 1969.— 320 с.
170. *Промышленные испытания карьерного вентилятора АП-20КВ / Филатов С. С., Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф. и др.* // *Цветная металлургия.*— 1973.— № 23.— С. 62—65.
171. *Конорев М. М.* Новые разработки в области карьерной аэрологии // *Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Материалы международного симпозиума SRM-95 / ГИ УрО РАН.*— Екатеринбург, 1997.— С. 172—177.
172. А. с. 1652604 СССР, МКИ 5 Е 21 F 1/00. Установка для проветривания карьеров / *Черницкий И. А., Аверин Б. А., Боровских Л. Д., Скачков Г. И., Конорев М. М., Смирнов Г. П., Горегляд Ю. Н., Мальгин О. Н.* (СССР).— № 4699706/03; Заяв. 05.06.09; Опубл. 30.05.91, Бюл. изобр.— 1991.— № 20.
173. *Куликов З. П., Суслин Ю. Э.* Установка УВ-1 для проветривания разрезов и совместная работа нескольких агрегатов в одной вентиляционной установке // *Всесоюзн. науч.-техн. конф. по борьбе с пылью и профилактике пневмокониозов на предприятиях угольной промышленности: Тез. докл.*— М.: ЦНИЭИуголь, 1979.— С. 118—120.
174. *Голубев В. А., Троп А. Е.* Надежность горного оборудования и эффективность его использования.— М.: Недра, 1974.— 81 с.
175. *Филатов С. С.* О средствах и режимах искусственного проветривания карьеров // *Горн. журн.*— 1973.— № 6.— С. 22—26.
176. А. с. 596020 СССР, МКИ 2 Е21 F 1/08. Карьерный турбовентилятор / *Конорев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф., Макаров В. Н.* (СССР).— № 2364804/22—03; Заяв. 24.05.76; Опубл. Бюл. изобр.— 1980.— № 37.
177. Экспериментальная проверка и оптимизация режимов эксплуатации вентиляторов-оросителей НК-12КВ и их промышленное испытание для проветривания карьеров / *Конорев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. и др.* // *Всесоюзн. науч.-техн. конф. по борьбе с пылью и профилактике пневмокониозов на предприятиях угольной промышленности: Тез. докл.*— М.: ЦНИЭИуголь, 1979.— С. 121—122.
178. *Качурин Л. Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы.— Л.: Гидрометеоздат.— 456 с.
179. *Конорев М. М., Макаров В. Н., Нестеренко Г. Ф.* К вопросу об исследовании динамических схем искусственного проветривания карьеров вентиляторами на базе турбовинтовых двигателей // *Труды / ВИМИ.*— М.: 1975.— Вып. № 1.— С. 126—132.
180. *Пак В. С.* Осевые вентиляторы для проветривания шахт.— М.: Углетехиздат, 1948.— 227 с.
181. *Garter APS.* The Axial Compressor Gas Turbine Principles and Practice.— London, 1955.— 220 p.
182. *Бутаков С. Е., Малых А. А.* Дальнедействующий агрегат СИО // *Промышленная вентиляция: Сб. трудов / ВНИИОТ ВЦСПС.*— Свердловск, 1951.— С. 20—28.
183. *Конорев М. М., Макаров В. Н., Ледерман А. И.* Система "Диспетчер-1" телеконтроля параметров атмосферы и управления карьерными вентиляторами // *Теоретические и прикладные вопросы воздухообмена в глубоких карь-*

ерах: Тез. докл. Всесоюзн. конф. (Апатиты 23.09—25.09.85) — Апатиты: КФ АН СССР, 1985.— С. 160—161.

184. Система радиоуправления карьерными вентиляторами с подсистемой передачи данных с газоаналитических станций и каналом передачи данных на ЭВМ "Диспетчер-2" / Ледерман А. И., Конорев М. М., Макаров В. Н., Ибрагимов Т. А. // Эффективные технологии при разработке полезных ископаемых: Тез. докл. конф. август 1990 / ИГД, Черметинформация.— М., 1990.— С. 109—110.

185. Разработка и ввод в эксплуатацию первой очереди комплексной терминальной системы предупреждения и защиты от техногенных загрязнений воздушной среды на базе вандалоустойчивых таксофонов "Орех" и использованном проводных и радиотелефонных каналов для передачи данных: Техническое задание. Согласовано правительством г. Москвы в 1996 г.— 16 с.

186. *Вершинин А. А.* Об искривлении оси свободной турбулентной неизо-термической струи гравитационными силами.— Свердловск, Средне-Уральское книжное издательство: 1970.— С. 145—148.

187. *Иванов Ю. В.* Экспериментальное исследование струй, развивающихся в потоке // Теория и расчет вентиляционных струй:— Труды / ВНИИОТ ВЦСПС.— Л., 1966.— С. 136—172.

188. *Назаров И. Т.* Исследование затопленной струи, перемещающейся под углом к своей оси // Гидравлика и гидротехника: Сб. тр.— Киев: Техника.— 1976.— С. 53—57.

189. *Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф., Макаров В. Н.* Исследование параметров струй и эффективности схем проветривания карьеров при работе вентиляторов в динамическом режиме // ФТППИ.— 1982.— № 1.— С. 64—69.

190. *Румишский Л. З.* Математическая обработка результатов эксперимента.— М.: Наука, 1971.— 240 с.

191. К методике выбора рациональных схем искусственной вентиляции карьеров методом физического моделирования / Конорев М. М., Макаров В. Н., Нестеренко Г. Ф., Филатов С. С. // Труды / ГГО.— Л.: Гидрометеоздат.— 1975.— С. 192—199.

192. *Нестеренко Г. Ф.* Координатник для исследования аэродинамических параметров карьерных вентиляторов // Вентиляция шахт и рудников: Межвузовский сб.— Л.: Изд-во ЛГИ, 1982.— Вып. 9.— С. 45—47.

193. *Горшенин А. С., Мартынов А. К.* Руководство к практическим занятиям в аэродинамической лаборатории.— М.: Машиностроение, 1967.— 205 с.

194. *Посохин В. Н.* О взаимодействии приточных струй с горизонтальными поверхностями ограждений // Гидравлика и санитарная техника.— Казань, 1968.— С. 35—45.— (Труды / Казанского инженерно-строительного института, вып. УП).

195. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы.— Л.: Химия, 1969.— 427 с.

196. *Вольнский М. С.* О дроблении капель в потоке воздуха // Доклады АН СССР.— 1948.— Т. 12.— № 3.— С. 37—42.

197. *Силамандри Г. Д., Нибоко Н. М.* Улавливание на пластинку покрытую слоем сажи, как метод определения крупности распыления топлива // Журн. технической физики.— 1957.— Т. XXVII.— № 3.— С. 62—70.

198. *Кальвин Г. С.* Испарение искусственного дождя при дождевании в условиях Заволжья // Достижения науки и передового опыта в сельском хозяйстве.— 1953.— № 5.— С. 75—82.

199. *Беляев В. В., Лебедев Б. М.* Дождевальные машины.— М.: Гос. уч.-тех. издат., 1957.— 207 с.

200. Волков В. С. Исследование воздухообмена в карьерном пространстве методом физического моделирования на примере Коркинского угольного разреза // Борьба с пылью и газами на карьерах.— Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1970.— С. 133—140.
201. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений.— М.: Наука, 1968.— 288 с.
202. Филатов С. С. К выбору средств и схем искусственной вентиляции карьеров // Горн. журн.— 1970.— № 6.— С. 14—18.
203. Филатов С. С. Вентиляция карьеров.— М.: Недра, 1981.— 206 с.
204. Созданье и применение карьерных вентиляторных установок типа УМП / Коркин Ю. М., Заслов В. Я., Тарасов В. Н. и др. // Горный журнал.— 1984.— № 11.— С. 43—45.
205. Опыт искусственного проветривания Саамского карьера / Коркин Ю. М., Тарасов В. Н., Гушин В. Э. и др. // Горный журнал.— 1981.— № 5.— С. 59—60.
206. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов.— М.: Машиностроение, 1969.— 389 с.
207. Рауз Х. Механика жидкости: пер. с англ.— М.: Стройиздат, 1967.— 376 с.
208. Биркзов Г., Сарантелло Э. Струи, следы и каверны: пер. с англ.— М.: Мир, 1964.— 457 с.
209. Зельдович Я. Б., Мьшикис А. Д. Элементы прикладной математики.— М.: Наука, 1965.— 615 с.
210. Коновев М. М., Блонский М. В. Оценка опыта к перспектив искусственной вентиляции карьеров вертикальными струями // Проблемы геотехнологии и недроведения. Докл. Междунар. конф. (6—10 июля 1998 г.): В 4 т.— Т. 1.— Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1998.— С. 315—324.
211. Промышленные испытания системы искусственной вентиляции на базе авиадвигателей НК-12МВ / Коновев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. и др. // Наземное применение авиадвигателей в народном хозяйстве. Часть 2. Материалы межотраслевой науч.-техн. конф.— М.: ВИМИ, 1981.— С. 57—62.
212. Дегазация отбитой горной породы и проветривание после массовых взрывов в карьерах вентиляторами на базе турбовинтовых двигателей / Коновев М. М., Нестеренко Г. Ф., Филатов С. С. и др. // Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах: Материалы Всесоюзн. совещ. (27—30 сентября 1971 г., Ленинград) / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— С. 158—161.
213. Подавление витающей пыли и кондиционирование воздуха в застойных зонах карьеров / Коновев М. М., Нестеренко Г. Ф., Павлов А. И., Филатов С. С. // Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах: Материалы Всесоюзн. совещ. (27—30 сентября 1971 г., Ленинград) / ГГО.— Л.: Гидрометеиздат, 1974.— С. 162—169.
214. Химико-биологический способ закрепления рыхлых пород на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате / Коновев М. М., Воронин Г. И., Терехова Э. Б., Нестеренко Г. Ф. // Проблемы создания защитных насаждений в условиях техногенных ландшафтов: Сб. статей.— Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979.— С. 129—134.
215. О механизации работ по химико-биологическому закреплению поверхностей, нарушенных горными работами / Коновев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. и др. // Труды / ИГД МЧМ СССР.— Свердловск, 1979.— Вып. 58.— С. 88—94.

216. *Волицук В. М., Муидинова Т. А.* Вымывание мелких аэрозольных частиц из атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.— 1974.— Т. 10.— № 1.— С. 64—70.
217. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1976.— 639 с.
218. *Махонько К. П.* Элементарные теоретические представления о вымывании примеси осадками из атмосферы // Труды / ИПГ.— М.: Гидрометеониздат, 1967.— Вып. 8.— С. 26—34.
219. *Редькин Ю. И.* Вымывание атмосферного аэрозоля снегом в приземном слое // Труды / ИЭМ.— М.: Гидрометеониздат, 1972.— Вып. 30.— С. 73—81.
220. *Битколова Н. З., Ивинов И. И.* Подавление пыли в карьерах при отрицательных температурах воздуха // Борьба с силикозом.— Сб. ст. / ИГД им. А. А. Скочинского — М.: Наука, 1982.— № 11.— С. 87—91.
221. *Иванов И. И., Мехов К. С.* Экспериментальные исследования по генерированию искусственного снега для подавления пыли в карьерах при отрицательных температурах воздуха // Борьба с силикозом.— Сб. ст. / ИГД им. А. А. Скочинского — М.: Наука, 1982.— № 11.— С. 92—98.
222. *Хргиан А. Х.* Физика атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1969.— 475 с.
223. Снег: Справочник / Ред. Д. М. Грей, Д. Х. Мейл.— Л.: Гидрометеониздат, 1986.— 751 с.
224. *Дессенс А.* Можем ли мы изменить климат? — Л.: Гидрометеониздат, 1969.— 120 с.
225. *Качурич Л. Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 367 с.
226. *Клебанов Ф. С.* К вопросу о подогреве шахтного воздуха // Проблемы рудничной аэрологии.— М.: Госгортехиздат, 1959.— 337 с.
227. *Коноров М. М.* Теоретические и экспериментальные исследования процессов пылегазоподавления при отрицательных температурах // Горные науки на рубеже XXI века: Материалы Международной конф. (12.09—19.09.97) / ГИ УрО РАН.— Екатеринбург: УрО РАН, 1998.— С. 214—220.
228. А. с. 1457517 СССР, МКИ 4 E 21 F 5/02. Способ пылегазоподавления / Росляков С. М., Коноров М. М., Нестеренко Г. Ф., Филатов С. С., Страшников О. Г., Князюк А. А., Зайцев В. Ф. (СССР).— № 4227757/22—03; Заяв. 13.04.87; Оpubл. 07.02.89, Бюл. изобр.— 1989.— № 5.— С. 259.
229. А. с. 1756579 СССР, МКИ E21 F 1/00, 5/02. Устройство для пылегазоподавления в карьерах / Нестеренко Г. Ф., Крючков В. Н., Коноров М. М., Росляков С. М. (СССР).— № 4815034/03; Заяв. 16.04.90, Оpubл. 23.08.92, Бюл. изобр.— 1992.— № 31.
230. *Страшников О. Г., Коноров М. М.* Феноменологическая модель процесса пылеобразования при массовых взрывах // Эффективные технологии, способы и средства, обеспечивающие современные требования к экологии при разработке месторождений полезных ископаемых (Москва, август 1990): Тез. докл. конф. / ИГД Минмета СССР.— М.: Черметинформация, 1990.— С. 97.
231. *Бересневич П. В., Ткаченко А. В.* Микроклимат железорудных карьеров и нормализация их атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1987.— 176 с.
232. *Баум Ф. А., Орленко Л. П.* Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.— 704 с.
233. *Андреев В., Панчев С.* Динамика атмосферных термиков.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— 152 с.
234. *Коноров М. М., Нестеренко Г. Ф.* Термодинамика формирования пылегазового облака (ПГО) при массовых взрывах // Горные науки на рубеже

XXI века: Материалы Международной конференции (12.09—19.09.97) / ГИ УрО РАН.— Екатеринбург: УрО РАН, 1998.— С. 220—226.

235. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы.— Л.: Гидрометеониздат, 1973.— 366 с.

236. Конорев М. М. Исследование влияния двухфазных струй на динамику пылегазового облака (ПГО) // Известия Уральского гос. горно-геологической академии.— Сер. Горное дело.— 1998.— Вып. 7.— С. 134—136.

237. Конорев М. М., Нестеренко Г. Ф. Исследование эффективности средств пылегазоподавления в карьерах // Международная конференция по открытым и подземным горным работам: Сб докл. (Москва, 27—28 мая 1998 г.).— М.: МГИ, 1998.— С. 53—56.

238. Столлровский А. Я. Водород: эффект защиты природы // Журнал Энергия: Экономика, техника, технология.— 1986.— № 10.— 205 с.

239. Христич В. А., Тумановский А. Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды.— Киев: Техника, 1983.— 144 с.

240. А. с. 508097 СССР, МКИ 2 E21 F 1/08. Карьерный турбовентилятор / Конорев М. М., Филатов С. С., Нестеренко Г. Ф. (СССР).— № 2063028/03; Заяв. 30.09.74; Опубл. 25.03.76, Бюл. изобр.— 1976.— № 11.— С. 160.

241. Совершенствование методов расчета параметров системы нормализации атмосферы в глубоких карьерах. Оценка эффективности вентиляционной системы и оздоровления атмосферы рабочих мест в глубоких карьерах: Отчет о НИР / Колл. автор, рук. Вассерман А. Д.— КФ АН СССР, Апатиты, 1987.— 110 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. НОРМАЛИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ	
1.1. Анализ результатов исследований по проблеме нормализации атмосферы карьеров и защиты окружающей среды. . .	8
1.2. Влияние климатических условий, горно-геологических и технологических факторов на загрязнение атмосферы карьеров	24
1.3. Оценка дефицита энергии неустойчивости атмосферы карьеров при температурных инверсиях	33
1.4. Интенсификация воздухообмена в карьерах	37
1.5. Зарубежный опыт в области создания средств контроля воздушной среды	42
ГЛАВА 2. СРЕДСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЯ В КАРЬЕРАХ	
2.1. Целесообразность применения воздушных винтов и газотурбинного привода при создании карьерных вентиляторов	47
2.2. Рабочие характеристики турбовинтовых двигателей при работе в вентиляторном режиме	49
2.3. Конструктивные элементы карьерных вентиляторов на базе ТВД	57
2.4. Требования к системе вентиляции карьеров. Типажный ряд карьерных вентиляторов	69
2.5. Анализ и разработка систем контроля параметров атмосферы карьеров	87
ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВОЗДУШНЫХ И ВОЗДУШНО-ВОДЯНЫХ (ДВУХФАЗНЫХ) СТРУЙ, СОЗДАВАЕМЫХ КАРЬЕРНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ НА БАЗЕ ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	
3.1. Параметры струй, развивающихся в стратифицированной атмосфере	94
3.2. Процесс взаимодействия струй	102
3.3. Лабораторные исследования параметров струй, перемещающихся в пространстве	108
3.4. Результаты натурных и аналитических исследований параметров воздушных струй карьерных вентиляторов на базе ТВД	117
3.5. Параметры воздушно-водяных (двухфазных) струй	127
ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В КАРЬЕРАХ	
4.1. Исследование эффективности схем искусственной вентиляции карьеров методом физического моделирования (на примере карьера "Мурунтау")	141

4.2. Результаты промышленных экспериментов по общеобменной вентиляции карьеров	167
4.3. Перспективы искусственной вентиляции карьеров вертикальными струями	178

ГЛАВА 5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ СТРУЙ В КАРЬЕРАХ

5.1. Опыт применения струй при положительных температурах ..	187
5.2. Исследование, разработка и внедрение систем пылегазоподавления при отрицательных температурах в карьерах (на примере карьера ПГХК)	204

ГЛАВА 6. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ, РАССЕЙНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛЕГАЗОВОГО ОБЛАКА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ПРИ МАССОВОМ ВЗРЫВЕ В КАРЬЕРЕ

6.1. Феноменологическая модель процесса формирования пылегазового облака	239
6.2. Термодинамическая модель процесса формирования ПГО ..	243
6.3. Математическая модель процесса подъема и рассеяния ПГО	250
6.4. Численная модель и программа расчета зон возможного загрязнения окружающей среды при массовых взрывах.	254
6.5. Оценка влияния температурной стратификации ПГО на процесс его подъема и рассеяния	258
6.6. Исследование влияния двухфазных струй на динамику ПГО. Результаты промышленных экспериментов	266

ГЛАВА 7. ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ВЕНТИЛЯЦИИ И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЯ, ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ

7.1. Оценка токсичности выхлопных газов карьерных вентиляторов-оросителей на основе ТВД	274
7.2. Акустические характеристики вентиляторов-оросителей ..	277
7.3. Экономическая оценка электрического и газотурбинного привода мощных карьерных вентиляторов	283
7.4. Сравнительная оценка экономических показателей систем нормализации условий труда в карьерах	288
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	292
ЛИТЕРАТУРА	295

Михаил Максимович Конорев
Геннадий Филиппович Нестеренко

**ВЕНТИЛЯЦИЯ И ПЫЛЕГАЗОПОДАВЛЕНИЕ
В АТМОСФЕРЕ КАРЬЕРОВ**

Научное издание

Рекомендовано к печати Ученым советом
Института горного дела и НИСО УрО РАН

ЛР № 020764 от 24.04.98

Редактор Н. У. Макарова
Компьютерный набор Т. Г. Петровой
Компьютерная верстка И. И. Глазыриной

НИСО УрО РАН № 134(00). Подписано к печати 20.09.00. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 20. Тираж 200. Заказ № 137.

Институт горного дела УрО РАН
620219 г. Екатеринбург, ГСП-936, ул. Мамнина-Сибиряка, 58.

Типография Президиума УрО РАН
620219 г. Екатеринбург, ГСП-169, ул. Первомайская, 91.

