

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

06  
778

ТРУДЫ

ВЫПУСК 359

МИКРОКЛИМАТ, ВОЗДУХООБМЕН  
И ИСКУССТВЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ  
НА АТМОСФЕРУ КАРЬЕРОВ

Под редакцией  
д-ра геогр. наук П. А. ВОРОНЦОВА  
и д-ра техн. наук Н. З. БИТКОЛОВА



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

ЛЕНИНГРАД - 1975  
Ленинградский

Гидрометеорологический ин-т  
БИБЛИОТЕКА

283340

В сборнике представлены материалы исследований последних лет, посвященные вопросам метеорологического обеспечения горных работ в карьерах. Приведены комплексные описания микроклимата и отдельных его элементов, рекомендованы методы оценки естественного воздухообмена и пути его активизации.

Предназначен для научных работников, интересующихся проблемами прикладной метеорологии, а также для специалистов по проектированию и эксплуатации предприятий по добыче полезных ископаемых открытым способом.

The publication presents the results of recent investigations in the field of meteorological provision of mining works in quarries. Complex descriptions of microclimate and its elements are given, methods of estimating natural air exchange and way of its activation are recommended.

The publication is meant for researchers interested in problems of applied meteorology and specialists designing and exploiting enterprises on open mining.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Метеорологические условия оказывают существенное влияние на экономику горных предприятий и условия труда на них. Не случайным поэтому является то большое внимание, которое уделяется различными организациями и предприятиями вопросам микроклимата и аэрации на открытых горных разработках. Наглядным подтверждением этого может служить I Всесоюзное совещание по микроклимату карьеров, проведенное в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова в 1971 г.

За истекшее время существенно расширилась география районов, явившихся объектом исследований. Во многом стандартизованы методы и значительно углублены исследования по прогнозированию опасных метеорологических явлений, стали проводиться комплексные исследования при участии специалистов по физике атмосферы и работников производства и отраслевых институтов.

В настоящем сборнике излагаются материалы исследований, полученные на различных карьерах страны за последние годы и охватывающие три основные группы вопросов, связанных с аэрацией карьеров, а именно: микроклимат, естественный воздухообмен и искусственное воздействие на атмосферу. Последнему уделяется большое внимание как в плане теоретического решения задачи, так в части моделирования процессов воздухообмена и проведения производственных опытов.

В сборник включены результаты работ, проведенных Главной геофизической обсерваторией, Институтом биофизики МЗ СССР, Научно-исследовательским институтом открытых горных работ МУП, СССР, Институтом горного дела МЧМ СССР, Среднеазиатским научно-исследовательским и проектным институтом цветной металлургии, Всесоюзным научно-исследовательским институтом безопасности труда в горнорудной промышленности МЧМ СССР, Уральским научно-исследовательским и проектным институтом медной промышленности, Ленинградским горным институтом и Пермским государственным университетом.

*Н. З. БИТКОЛОВ, П. А. ВОРОНЦОВ, В. С. НИКИТИН*

## **ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОЗДУХООБМЕНОМ В КАРЬЕРАХ**

Развитие открытого способа разработки предопределило постановку соответствующих исследований по изучению микро- и мезоклиматических факторов, определяющих воздухообмен в карьерах. К настоящему времени сформировались ряд научных центров в этом направлении: Москва — Всесоюзный центральный научно-исследовательский институт охраны труда (ВЦНИИОТ), Московский горный институт (МГИ), Государственный научно-исследовательский институт горно-химического сырья (ГИГХС), Институт гигиены труда и профессиональных заболеваний им. Ф. Ф. Эрисмана; Ленинград — Ленинградский горный институт (ЛГИ), Институт биофизики МЗ СССР, Главная геофизическая обсерватория (ГГО), Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ); Свердловск — Институт горного дела Министерства черной металлургии СССР (ИГД МЧМ СССР), Уральский научно-исследовательский и проектный институт медной промышленности (Унипромедь), Центральный научно-исследовательский институт профилактики пневмокониозов и техники безопасности (ЦНИИПП); Челябинск — Научно-исследовательский институт открытых горных работ МУП СССР (НИИОГР), Челябинский политехнический институт (ЧПИ); Ташкент — Ташкентский политехнический институт (ТашПИ), Среднеазиатский научно-исследовательский и проектный институт цветной металлургии (Среднеазиатпроцветмет); Алма-Ата — Казахский политехнический институт (КазПИ), Институт горного дела АН КазССР (ИГД АН КазССР); Кривой Рог — Всесоюзный научно-исследовательский институт безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ); Днепропетровск — Институт геотехнической механики АН УССР (ИГТМ).

В результате комплексными исследованиями по проблеме улучшения условий труда в карьерах охвачены север СССР, Урал, Украина, Казахстан и Средняя Азия, что говорит об определенном прогрессе в постановке научных исследований. В не-

большом объеме начаты исследования на карьерах Кольского полуострова (Горно-металлургический институт Кольского филиала АН СССР) и в Восточной Сибири (Иркутский политехнический институт).

Вместе с тем большинство районов месторождений полезных ископаемых Сибири и Дальнего Востока, разрабатываемых открытым способом, пока остаются за пределами внимания исследователей. В особой мере это относится к районам вечной мерзлоты, где специфические условия теплообмена между почвой и воздухом создают свои особенности в формировании приземных инверсий в разные периоды года.

Исследования, связанные с улучшением условий труда на открытых горных работах, ведутся в четырех основных направлениях:

- 1) микроклимат и метеорологический режим;
- 2) естественный воздухообмен;
- 3) локализация, разбавление и распространение примесей;
- 4) искусственное проветривание и управление воздухообменом.

На основании производственных наблюдений получены комплексные описания микроклимата и метеорологического режима ряда действующих карьеров страны. Полученные данные, подтвержденные отдельными исследованиями на других предприятиях, позволили выявить общие закономерности формирования отдельных микроклиматических элементов и изменение метеопараметров в карьерах. Следствием этого явилась разработка методов прогноза и расчета отдельных слагающих микроклимат параметров, что в свою очередь послужило исходным материалом для последующего обоснования условий и интенсивности естественного воздухообмена.

Вместе с тем комплексные климатические описания получены для весьма ограниченного ряда климатических зон. В основном это Урал, Казахстан, Алтай и отдельные районы Средней Азии. Указанные работы должны быть продолжены и расширены в географическом аспекте.

Не менее важно комплексировать указанные исследования с аэрологическим зондированием, имея в виду последующее установление взаимосвязей воздухообмена в карьерах с процессами больших масштабов. Практически такие работы систематизированно проводились только ГГО совместно с НИИОГР на Коркинском карьере и с Институтом биофизики на карьере Аксай.

В последние годы углубленное развитие получили исследования, связанные с тепловыми процессами, происходящими в карьерах как за счет температурного режима окружающего района, так и в результате воздействия внутренних слоев земли, вскрываемых в результате горных работ. Наличие и большая роль процессов, происходящих на разделе почва — воздух, в общем плане очевидны, но их количественные взаимосвязи в карьерах, полученные в Институте биофизики, позволяют более точно характеризовать

их роль в формировании естественного воздухообмена, прогнозировать термический режим глубоких карьеров и, что особенно важно, оценить последствия, связанные с техническими аспектами разработки карьера, и пути возможной утилизации тепла из почвы.

Не менее важным аспектом микроклиматических исследований является обоснование норм комфорта горнорабочих для карьеров различных климатических зон с учетом специфических условий труда.

Существующие в настоящее время санитарные нормы и правила относительно комфортных климатических условий на рабочих местах должны применяться в карьерах с учетом переменных, в широком плане, внешних условий и характера работы, связанного с периодическим переходом рабочего из помещения во внешнюю среду и обратно.

Еще принять во внимание, что температура воздуха, регламентируемая санитарными нормами, должна быть не ниже 15°C, а наружная может достигать -40°C, то столь значительный перепад температуры может привести к нежелательным последствиям из-за трудности быстрой адаптации человека. Не случайно на ряде карьеров отмечена высокая простудная заболеваемость в зимний период.

Дальнейшие исследования по микроклимату и метеорологическому режиму в карьерах должны быть направлены на получение комплексных микроклиматических описаний и данных аэрологического зондирования с целью последующей разработки методов прогноза опасных метеорологических явлений, их обобщения и анализа применительно к различным горнопромышленным районам страны. Особый интерес в плане современных задач по охране природы представляют работы по изучению влияния открытых горных работ на окружающую среду.

В области естественного проветривания карьеров наиболее фундаментальные исследования, позволившие дать классификацию и расчет различных схем динамического проветривания, проведены в ИГД им. А. А. Скочинского и ВЦНИИОТ. Результаты этих работ позволяют не только оценивать интенсивность естественного проветривания действующих карьеров, но и прогнозировать санитарную характеристику воздуха в них на различных этапах разработки.

В последние годы разработанная теория и методы расчета естественного проветривания пополнились рядом частных исследований по уточнению структуры воздушных потоков при различной состоянии атмосферы, появились работы по активизации естественного проветривания частичным управлением и перестройкой поверхностных воздушных потоков.

Говоря об естественном проветривании, необходимо указать на комплекс работ, связанных с выявлением механизма его нарушения, влекущим за собой накопление примесей в опасных кон-

центрациях. Прежде всего к их числу относятся исследования Института биофизики, ГГО, НИИОГР и Уральского УГМС, результаты которых позволили выявить типы инверсий, формирующихся в карьерах, причины их возникновения, развития и возможные пути прогноза.

Получены экспериментальные данные, определяющие достоверные методы оценки состояния и степени устойчивости атмосферы в карьерах. В частности, доказано, что в слое карьер — поверхность данные стандартных наземных наблюдений в своем большинстве не отражают истинного состояния атмосферы, завывшая и занижая показания в разные периоды суток. Это существенно усложняет разработку методов прогноза инверсий в карьерах и делает весьма ограниченными известные к настоящему времени решения.

В целом по естественному воздухообмену наиболее сложными и актуальными задачами являются оперативные методы прогноза инверсий, опасных в санитарном плане и разработка вопросов термодинамики воздухообмена при одновременном воздействии тепловых и динамических процессов.

Локализация и снижение интенсивности источников выделения примесей в атмосферу карьеров осуществляются в основном комплексом инженерно-технических мероприятий. Вместе с тем в ряде случаев необходим не только учет метеорологических факторов, но и их непосредственное использование при обосновании и разработке того или иного профилактического комплекса. Прежде всего это относится к вопросам защиты от тепловых нагрузок, увлажнения почвы, защиты от эрозии, правильного расположения внешних источников пылегазовыделения и др.

Конкретизация и практическое использование метеорологической информации при решении задач улучшения условий труда являются одним из основных направлений в проблеме оздоровления санитарно-гигиенической обстановки на рабочих местах и в карьерах в целом.

Многочисленная повторяемость загрязнения атмосферы карьера вследствие нарушения естественной циркуляции, повлекшая за собой вынужденное прекращение работ, предопределила поиск методов и путей интенсификации воздухообмена. К настоящему времени обобщены и проанализированы различные способы искусственного проветривания, оценена их эффективность, рекомендованы наиболее рациональные схемы и методы, а также даны необходимые расчетные обоснования. Отдельные схемы испытаны в производственных условиях.

Большой комплекс работ в области обоснования и выбора способов искусственного проветривания проведен Институтом биофизики, предложившим и обосновавшим метод искусственного проветривания нисходящими свободными струями с расчетом необходимых параметров и их экспериментальным подтверждением.

Отдельные решения задачи искусственного проветривания име-

ются в работах ИГД МЧМ СССР, НИИОГР, Унипромедь, Средазнипроцветмет, ЛГИ и ЛГМИ.

Оценивая в целом достигнутые результаты положительно, необходимо отметить, что в ряде случаев предложения по искусственному проветриванию базируются на чисто механическом воздействии на атмосферу карьера, без учета природы процессов, нарушающих воздухообмен.

Поэтому представляется перспективной, наряду с известными положительными решениями, разработка методов теплового воздействия на атмосферу карьеров. При этом для исключения больших бесполезных потерь тепловой энергии необходим поиск возможных путей и методов низкотемпературного нагрева на больших площадях, а также накопления и использования тепловой энергии солнца и горных пород.

Таким образом, в направлении искусственного проветривания карьеров наиболее перспективными вопросами будущего являются: совершенствование существующих и разработка принципиально новых методов интенсификации воздухообмена, с обязательным учетом природы процессов, формирующих накопление примесей в определенных метеорологических условиях. Такая постановка исследований в сочетании с оперативными методами прогноза метеорологической ситуации во времени позволит не только экономично ликвидировать возникающие загрязнения, но и предупредить их появление.

Говоря о методах и способах искусственного проветривания, нельзя их отделять от тех средств, с помощью которых они могут быть реализованы.

Наиболее значительные работы в этом направлении выполнены в ИГД МЧМ СССР, где предложена целая группа винтовых вентиляторов, базирующихся на средствах авиационной техники. Наиболее приемлемыми и значимыми среди них, нашедшими признание и принятыми к реализации, являются агрегаты местного проветривания типа ОВ-3 и им подобные, которые могут быть использованы и для общей вентиляции небольших карьеров. Более крупные машины имеют массу серьезных недостатков, ограничивающих их серийное применение, как-то: очень большие габариты, трудности управления направлением струи и т. п.

Из других средств искусственного проветривания надо отметить конструкцию, разработанную в НИИОГР совместно с Институтом горной механики и технической кибернетики им. М. М. Федорова, с электрическим приводом турбины реактивного двигателя. Известны также установки на базе одноконтурного турбореактивного двигателя, разработанные в Унипромеди, а также тепловые установки, созданные в Средазнипроцветмете и ЧПИ.

Дальнейший прогресс в создании средств искусственного проветривания предвидится, с одной стороны, в повышении дальности установок, но при этом определяющими условиями, наряду с экономичностью, являются мобильность, габарит и регулируемость производительности в широких пределах. Интерес

в этом плане представляют разработки ГИГХС совместно с Институтом биофизики по использованию двух- и многоконтурных ТРД с отделением продуктов сгорания, их утилизацией, с подачей для проветривания только чистой доли воздуха, используемой на охлаждение двигателя.

С другой стороны, необходим поиск новых методов эффективного использования тепловой энергии с повышением кпд, а также методов накопления и реализации естественных источников тепла.

В целом практическое решение проблемы искусственного проветривания представляется в ближайшие годы реальным при условии тщательной координации и кооперации исследований, ликвидирующих или сводящих до минимума распыление средств и сил на малозначимые работы, исключая местнический подход к решению крупной проблемы улучшения условий труда на открытых горных работах.

П. А. ВОРОНЦОВ, В. И. СЕЛИЦКАЯ, Е. В. ПЕТРОВА

## ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В КАРЬЕРЕ АКСАЙ

Стратификация атмосферы, обусловленная в первую очередь термическим режимом, играет существенную роль в накоплении и распространении примесей в карьерах.

Изучение термического режима нижнего 50-метрового слоя в карьере Аксай проводилось сотрудниками Института биофизики [5, 6]. В настоящей работе изложены результаты исследований температурного режима пограничного слоя над карьером Аксай за 1971—1972 гг.

### Температурный режим

Для исследования вертикального распределения и суточного хода метеозаэроэлементов в слое атмосферы 300—500 м применялся метеорограф на привязных шарах, использовался малообъемный аэростат ПАМ-500 и проводилось зондирование самолетом АН-2 до высоты 2000 м над карьером Аксай и г. Джембулом. Дополнительно использовался материал радиозондирования над Джембулом. Результаты этих измерений приведены в табл. 1.

В зимнее время над карьером развивается инверсия температуры воздуха в слое почти до 300 м. В октябре в дневные часы до уровня 100—200 м наблюдается близкое к неустойчивому состояние, а выше 300—500 м — почти изотермическая стратификация.

Повторяемость величин  $\gamma^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  за январь—февраль по данным аэростатного зондирования и за октябрь по измерениям на самолете дана в табл. 2. Как видно из приведенных данных, в январе—феврале в слое 0—25 м, фактически на бровке карьера, имеет место преобладание инверсионной стратификации, но часто наблюдаются случаи, близкие к неустойчивому состоянию. С высотой тип стратификации почти не изменяется. Таким образом, при характерных для января—февраля частых инверсиях температуры иногда имеют место и положительные значения  $\gamma$ , что было отмечено и в работах [5, 6].

Таблица 1

Средняя температура воздуха  $t^{\circ}\text{C}$  и вертикальный температурный градиент  $\gamma^{\circ}\text{C}/100$  м за дневные часы

Период	Число случаев	Характеристика	Н м						
			0	25	50	100	150	200	300
<b>Карьер Аксай (аэростат)</b>									
I—II	26	$t^{\circ}\text{C}$	-12,3	-12,0	-11,7	-11,5	-11,3	-11,0	-10,7
		$\gamma^{\circ}\text{C}/100$ м		-1,2	-1,2	-0,4	-0,4	-0,6	-0,3
Период	Число случаев	Характеристика	Н м						
			0	100	200	300	400	500	750
<b>Карьер Аксай (самолет)</b>									
X	11	$t^{\circ}\text{C}$	12,3	11,2	10,4	10,2	10,3	10,4	10,0
		$\gamma^{\circ}\text{C}/100$ м		0,9	0,8	0,2	-0,1	-0,1	0,2
<b>Джамбул (радиозонды)</b>									
I—II	48	$t^{\circ}\text{C}$	-14,1	-13,4	-12,8	-12,5	-12,3	-12,2	-11,7
		$\gamma^{\circ}\text{C}/100$ м		-0,7	-0,6	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2
X	9	$t^{\circ}\text{C}$	13,6	12,3	11,4	10,8	10,2	10,0	9,0
		$\gamma^{\circ}\text{C}/100$ м		1,3	0,9	0,6	0,6	0,2	0,4

Таблица 2

Повторяемость (%) величин  $\gamma^{\circ}\text{C}/100$  м. Карьер Аксай, 1972 г.

Слой, м	Число случаев	Градации $\gamma^{\circ}\text{C}/100$ м					
		>0,9	0,9—0,1	0	-0,1; -0,9	-1,0; -1,9	<-2,0
<b>Январь — февраль</b>							
0—25	26	27	19	4	4	8	38
25—50	24	25	12	8	8	17	30
50—100	24	25	17	17	21	8	12
100—150	21	14	19	10	28	24	5
150—200	17	6	12	29	41	6	6
<b>Октябрь</b>							
0—100	13	77	15	8	—	—	—
100—200	13	30	54	8	8	—	—
200—300	13	15	61	—	15	8	—
300—400	13	31	39	—	15	15	—
400—500	13	—	54	—	23	23	—
500—750	13	23	47	—	15	15	—

В октябре в нижнем слое 0—300 м стратификация неустойчива в дневные часы, и только с уровня 200—300 м начинают развиваться инверсии. В ночные часы инверсия должна усиливаться.

Зимой в ночные часы над карьером часто получает развитие приземная инверсия, а в октябре в дневные часы она, как правило, не развивается, а приподнимается и сохраняется в слое 400—600 м. Таким образом, в оба эти периода часто имеют место благоприятные условия для накопления в нижних слоях пыли.

Стратификация воздуха в октябре над Джамбулом, по данным радиозондирования, примерно такая же: неустойчивое состояние в слое до 200—300 м и почти изотермия на уровне 500—600 м. В январе—феврале, по средним данным, над Джамбулом инверсионное состояние отмечено до высоты 750 м.

Таблица 3

Распределение средней относительной влажности воздуха  $f\%$

Период	Число случаев	H м						
		0	25	50	100	150	200	300
<b>Карьер Аксай (аэростат)</b>								
I—II	25	75	76	75	74	71	70	67
Период	Число случаев	H м						
		0	100	200	300	400	500	750
<b>Карьер Аксай (самолет)</b>								
X	10	34	34	34	31	29	28	27
<b>Джамбул (радиозонды)</b>								
I—II	57	62	61	60	60	59	57	52
X	10	27	28	29	30	30	30	27

Некоторый интерес представляет распределение относительной влажности воздуха (табл. 3). В январе—феврале средняя величина  $f$  в слое до 300 м находится в пределах 75—65%, а в октябре составляет внизу 30—35%, выше к уровню 750 м уменьшается до 27%. Над Джамбулом внизу значения  $f$  несколько меньше, чем над Аксаем, а к уровню 300—400 м в октябре становятся весьма близкими к  $f$  над Аксаем. Распределение относительной влажности показывает, что в октябре в пограничном слое располагается очень сухой воздух; в январе—феврале, хотя величина  $f$  несколько возрастает, воздух также далек от насыщения. Следовательно, ухудшение видимости над карьером Аксай наблюдается при состоянии воздуха, далеко от насыщения, и вызвано распространением пыли в толще воздуха.

В табл. 4 приведен пример суточного хода температуры и влажности воздуха за 4—5 февраля 1972 г. Как видно, в дневные часы имело место падение температуры воздуха с высотой.

Таблица 4

Суточный ход температуры воздуха  $t^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $f\%$  над карьером Аксай 4 и 5 февраля 1972 г.

Время, ч	Метео- элемент	Н м					
		0	50	100	150	200	300
13,0	$t$	-9,7	-9,8	-10,0	-10,5	-10,1	-7,6
	$f$	47	55	55	56	57	58
16,9	$t$	-13,1	-14,0	-12,3	-12,2	-12,7	—
	$f$	76	80	80	80	80	—
19,0	$t$	-12,9	-13,4	-13,6	-13,6	-13,5	-12,9
	$f$	68	71	74	76	76	77
21,1	$t$	-14,6	-13,1	-12,6	-12,6	-12,6	-12,6
	$f$	73	76	76	76	76	73
23,0	$t$	-14,7	-12,8	-12,1	-12,0	-11,9	-11,5
	$f$	73	73	73	71	69	68
01,0	$t$	-15,8	-13,2	-13,0	-12,4	-12,0	-11,9
	$f$	87	85	85	86	84	86
03,0	$t$	-16,1	-13,1	-12,1	-11,6	-11,6	-11,7
	$f$	81	82	78	76	75	74
05,0	$t$	-16,4	-11,6	-10,8	-11,2	-11,4	-11,4
	$f$	70	67	63	63	61	58

Начиная с 21 ч происходило развитие приземной инверсии, интенсивность которой достигла максимума к 5 ч, однако высота развития инверсии в этот день была невелика, всего 50—100 м. Относительная влажность практически была постоянной во всем слое до 400 м.

Поскольку вопрос о развитии инверсий температуры воздуха над карьером представляет большой практический интерес, приведем сводную табл. 5 отдельных случаев инверсий ( $H_m$  — высота инверсии,  $t^{\circ}\text{C}$  — температура воздуха,  $f\%$  — относительная влажность воздуха,  $\Delta H_m$  — мощность инверсии,  $\Delta t^{\circ}\text{C}$  интенсивность инверсии,  $\Delta f\%$  — уменьшение относительной влажности в слое инверсии) за февраль (табл. 5) и октябрь. В феврале аэростатные наблюдения проводились и в ночные часы, поэтому можно более подробно проследить условия развития инверсий. Подъемы аэростата происходили при относительно слабых ветрах. Из общего числа 26 подъемов инверсия была отмечена в 19 случаях, т. е. в 73%. Представляет интерес период 4—5 февраля. В 13 ч 4 февраля отмечена приземная инверсия с уровня 150 м, верхняя граница которой была выше 370 м. К 21 ч инверсия опустилась до поверхности земли при некотором понижении температуры и уве-

## Характеристика инверсий температуры над карьером Аксай

Дата	Время, ч	Начало инверсии			Конец инверсии			Характеристика инверсии		
		Н м	t°C	f%	Н м	t°C	f%	Δ Н м	Δ t°C	Δ f%
<b>Аэростатное зондирование</b>										
3 II	17,4	50	-15,4	95	125	-12,4	89	75	3,0	6
3	19,3	50	-15,8	77	200	-13,9	70	150	1,9	7
3	21,0	0	-14,6	73	50	-13,8	68	50	0,8	5
4	13,0	150	-10,5	56	370	-4,8	52	220	5,7	4
4	16,9	50	-14,0	80	125	-11,9	80	75	2,1	0
4	19,0	75	-13,6	72	370	-12,6	76	295	1,0	4
4	21,1	0	-14,6	73	370	-12,5	72	370	2,1	1
4	23,0	0	-14,7	73	300	-11,5	68	300	3,2	5
5	01,0	0	-15,8	87	370	-11,8	86	370	4,0	1
5	03,0	0	-16,1	81	200	-11,6	75	200	4,5	6
5	05,0	0	-16,4	70	100	-10,8	63	100	5,6	7
10	17,7	0	-12,4	77	150	-11,0	63	150	1,4	14
10	19,0	0	-13,4	76	280	-11,1	61	280	2,3	15
10	21,0	0	-14,0	70	280	-11,7	58	280	2,3	12
10	22,9	0	-14,4	74	270	-11,4	59	270	3,0	15
15	19,0	50	-8,7	77	240	-6,6	56	190	2,1	11
15	22,9	0	-10,2	77	170	-6,6	57	170	3,6	20
17	01,0	100	-13,8	97	190	-13,5	97	90	0,3	0
17	03,1	25	-14,8	93	100	-13,5	84	75	1,3	9
<b>Самолетное зондирование</b>										
12 X	11,4	300	0,0	65	1000	3,2	65	700	3,2	0
19	11,0	160	-1,2	61	1000	6,4	26	840	7,6	35
21	10,9	200	7,6	34	850	10,4	25	650	2,8	9
23	10,9	250	10,2	30	780	12,0	22	530	1,8	8
28	10,7	0	20,2	14	230	20,2	10	230	0,0	4
29	12,0	300	7,9	46	580	12,3	40	280	4,4	6

личении относительной влажности. Одновременно отмечалось уменьшение высоты ее верхней границы и рост разности температур  $\Delta t^\circ\text{C}$  на верхней и нижней границах инверсионного слоя, к 5 ч утра  $\Delta t = 5,6^\circ\text{C}$  и толщина инверсионного слоя всего 100 м.

Изменения относительной влажности в слое инверсии были невелики. Например, 10 февраля уже в 17 ч инверсия наблюдалась от земной поверхности, а ее верхняя граница располагалась выше

300 м. Повышение температуры в слое инверсии было более 3,0°C, а относительная влажность уменьшилась на 10—15%.

В октябре полеты самолета проводились только в дневные часы. Из 13 случаев зондирования инверсии отмечались в семи. В шести случаях имело место развитие приподнятых инверсий, и только 28 октября была отмечена относительно слабая размывающаяся инверсия, вернее изотермия, в слое от 0 до 230 м (при относительно высокой температуре воздуха (20, 2°C) и очень малой относительной влажности (10—14%)).

Таблица 6

Величины  $\Delta t$  и  $\Delta f$  в районе карьер  
Аксай — Джамбул. Октябрь 1972 г.

	Высота, м				
	0	100	200	500	1000
$\Delta t^{\circ}\text{C}/\text{ч}$					
Утро . . . . .	1,5	1,7	1,3	0,2	1,0
День . . . . .	-2,5	-0,6	-0,3	0,4	—
$\Delta f \text{ \%}/\text{ч}$					
Утро . . . . .	-4	-5	-6	-6	-8
День . . . . .	4	2	1	1	1

Следовательно, в дневные часы над Аксаем, как правило, наблюдается приподнятая инверсия температуры, начинающаяся с уровня 200—300 м; толщина слоя 300—800 м. Большие перепады температуры ( $\Delta t=7,6^{\circ}\text{C}$ ) и влажности ( $\Delta f=35\%$ ), наблюдаемые 19 октября в 11 ч, явно указывают на фронтальный характер приподнятой инверсии. В остальных случаях имела место типичная инверсия, разрушающаяся или ослабевающая к полуденным часам.

В заключение приведем некоторые данные, характеризующие интенсивность прогрева и охлаждения воздуха ( $\Delta t^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ) в октябре в районе карьера Аксай и Джамбула. Разница по времени между самолетным зондированием над карьером Аксай и Джамбулом была 2—2,5 ч, и поэтому оказалось возможным рассчитать средние величины прогрева или охлаждения воздуха на разных уровнях в слое до 1000 м.

В табл. 6 даны значения  $\Delta t^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  и  $\Delta f\%/ч$  в дневные часы в слое от 500 до 1000 м. Как показал анализ, до 14 ч шел прогрев масс воздуха, а после 14—15 ч — охлаждение. Наибольшие величины  $\Delta t^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  наблюдались в нижнем 100—200-метровом слое и составляли 1,7—1,3°C, охлаждение воздуха, если не считать земной поверхности, было в слое 100—200 м и начиналось сравнительно

воздуха в этом слое и способствует развитию значительной турбулентности. При скорости 6,1 м/с и более ветровой эквивалент вертикального градиента температуры, как правило, значительно больше  $\gamma_a$  (особенно в октябре). Следовательно, в этих условиях должна быть весьма интенсивная турбулентность с неустойчивым состоянием атмосферы. По данным отдельных наблюдений, величины  $\frac{\partial u}{\partial z} \approx 8 \div 13$  м/с, что будет соответствовать развитию настолько интенсивной турбулентности и неустойчивости, что практически роль термической стратификации не будет иметь в этих условиях большого значения.

Третьей характеристикой турбулентности над карьером являются значения пульсаций температуры воздуха, измеряемых на самолете. Чем интенсивнее турбулентность, тем больше пульсационные величины многих метеозлементов и, в частности, температуры. Отсутствие пульсаций температуры показывает на более спокойные условия движения воздуха и ослабление турбулентности. При полетах над карьером на 3-минутных площадках наряду со средними величинами температуры воздуха измерялись более чувствительным приемником ее пульсации  $\Delta t^\circ\text{C}$  около средней величины  $t^\circ\text{C}$ , а также период пульсаций  $\tau$  с. Зная период пульсаций и скорость самолета  $V$  м/с, мы подсчитали размеры атмосферных вихрей  $L_x$  м по формуле

$$L_x = \tau V$$

(скорость самолета  $V = 140$  км/ч или 38,5 м/с).

Результаты расчета даны в табл. 8. В ней приведено также число точек  $n$ , определяющих значения  $\Delta t$ , а также максимальные значения  $\Delta t$ , осредненные по 10 измерениям. Следует отметить, что наличие пульсаций температуры наблюдалось в 13 случаях из 26 и, как правило, в самых нижних слоях, до уровня 300—500 м. Наиболее интересные полеты были 23, 27 и 29 октября, когда значительные пульсации  $\Delta t^\circ\text{C}$  наблюдались только в подынверсионном слое до 300—500 м, а выше они отсутствовали. Особенно большой интерес представляет анализ максимальных величин пульсаций, достигающих в отдельных полетах значений, близких к  $1^\circ\text{C}$ , а иногда и более высоких, что указывает на наличие вертикальных и горизонтальных смещений масс воздуха с интенсивным обменом. Размеры атмосферных вихрей менялись в относительно небольших пределах (60—100 м) и, как правило, уменьшались с высотой.

Наличие пульсаций на высотах, больших 500 м, также имеет место, но вызваны они уже мезо- или макропроцессами; они характерны для вихрей относительно больших размеров (около 230—250 м). Таким образом, эти данные подтверждают большую роль, в первую очередь, подстилающей поверхности в развитии относительно сильной турбулентности в нижних слоях над карьером Аксай.

Характеристика пульсаций температуры воздуха. Карьер Аксай.  
Октябрь 1972 г.

Число	№ по- лета	Время, ч	H км	t°С	Δ t°С				τ с	L	n
					+	-	+	-			
23	5	11,5	0,1	11,0	0,10	0,16	0,26	0,52	2,2	86	540
		11,7	0,2	10,2	0,14	0,14	0,60	0,45	2,6	102	474
		11,8	0,3	10,5	0,14	0,14	0,61	0,56	2,1	82	540
		0,5—2,0	—	0	0	—	—	—	—	—	—
24	6	11,7	0,1	14,1	0,10	0,08	0,22	0,42	2,0	78	540
		0,2—2,0	—	0	0	—	—	—	—	—	—
25	7	11,4	0,1—1,0	—	0	0	—	—	—	—	—
25	8	15,9	0,1—1,0	—	0	0	—	—	—	—	—
		16,4	1,5	5,4	0,12	0,12	0,28	0,40	6,3	246	540
		16,5	2,0	—	0	0	—	—	—	—	—
26	9	11,3	0,1	16,6	0,06	0,10	0,25	0,36	1,5	59	484
		0,2—0,5	—	0	0	—	—	—	—	—	—
		11,7	0,75	12,8	0,08	0,12	0,36	0,38	2,9	114	534
		1,0—2,0	—	0	0	—	—	—	—	—	—
26	10	16,3	0,1—0,5	—	0	0	—	—	—	—	—
		16,7	0,75	11,8	0,16	0,22	0,92	0,72	2,5	97	504
		1,0—2,0	—	0	0	—	—	—	—	—	—
27	11	11,6	0,1	19,0	0,18	0,16	0,66	0,60	1,9	74	540
		11,7	0,2	18,6	0,10	0,18	0,34	0,71	3,5	134	398
		11,8	0,3	18,2	0,14	0,14	0,52	0,75	1,5	58	535
27	11	0,75—2,0	—	0	0	—	—	—	—	—	
28	12	11,4	0,1—0,75	—	0	0	—	—	—	—	—
		11,8	1,0	12,5	0,14	0,10	0,42	0,36	6,0	235	485
29	13	12,5	0,1	10,0	0,16	0,22	0,71	0,96	1,6	63	510
		12,6	0,2	8,9	0,44	0,28	1,28	0,94	2,3	93	441
		12,7	0,3	7,9	0,48	0,40	1,64	1,32	2,2	87	540
		12,8	0,5	11,0	0,12	0,12	0,58	0,46	1,4	55	505

В заключение рассмотрим случаи мощных восходящих и нисходящих движений воздуха, отмеченных бортаэрологом во время полетов над карьером на самолете АН-2.

В большинстве случаев относительно мощные вертикальные движения воздуха были отмечены на высотах 1000 м и более (полеты 21, 25, 26 и 28 октября) и на малых высотах (26 и 28 октября). Необходимо отметить, что при сильных бросках самолета над

Распределение дымки и ветрового режима в карьере Аксай  
Октябрь 1972 г.

Число	Время, ч	Облачность	Высота, км					
			0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5
12	11,4	8/0 Ci	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	= <sup>0</sup>	= <sup>0</sup>	= <sup>0</sup>
16	11,6	9/6 Cb, Ac	=	=	=	= <sup>0</sup>	= <sup>0</sup>	= <sup>0</sup>
19	11,0	0/0	= <sup>2</sup>	=	=	=	= <sup>0</sup>	= <sup>0</sup>
21	10,9	0/0	= <sup>2</sup>					
23	10,9	0/0	= <sup>2</sup>					
24	11,0	0/0	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	=	= <sup>0</sup>
25	10,8	0/0	= <sup>2</sup>					
25	15,4	0/0	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	= <sup>2</sup>	=	=	=
26	10,7	7/0 Ci	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 
26	15,7	9/3 Ac, Sc	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= 	= 	= <sup>2</sup> 
27	11,0	9/0 Ci, Ac	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 
28	10,7	3/0 Ci, Ac	= 	= 	= 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= 
29	12,0	8/0 Ci, Ac	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= <sup>2</sup> 	= 	= 

Примечание. =<sup>0</sup>— дымка слабая, =— дымка умеренная (средняя), =<sup>2</sup>— дымка сильная (плотная).

карьером полеты не проводились и горизонтальное зондирование началось на больших уровнях.

В целом можно отметить, что в октябре над карьером Аксай имеет место интенсивное развитие турбулентных движений на нижних уровнях пограничного слоя, возрастающее с ростом ско-

рости ветра и способствующее подъему и переносу пыли с поверхности земли в верхние слои, что сильно ухудшает видимость. В некоторых случаях видимость при плотной дымке была меньше 0,5 км, но, к сожалению, при визуальных наблюдениях более детальные значения наклонной видимости с самолета получить было затруднительно. В табл. 9 приведено распределение дымки разной интенсивности и вектора ветра на разных уровнях в слое до 1,5 км над Аксаем.

Здесь интересным является факт почти постоянного наличия плотной дымки в слое от поверхности земли до 500 м. Только при двух полетах, 16 и 28 октября, в нижнем слое дымка имела среднюю плотность. К уровню 1,0 км интенсивность дымки несколько уменьшается, но почти в 40% случаев плотная дымка сохраняется в слое до 1,5 км.

В первом приближении можно считать, что плотная дымка во всем 2—3-километровом слое связана с макропроцессами и переносом пыли с юго-юго-запада Средней Азии. Запыленность только нижних слоев до высоты 0,5 км больше связана с мезо- и микропроцессами в карьере Аксай. В этом случае примерно можно считать, что в октябре в 45% случаев распространение дымки в пограничном слое было обусловлено местными факторами, а в остальных 55% — макропроцессами.

В заключение отметим следующее.

1. В зимнее время над карьером Аксай часто развивается радиационная инверсия температуры в слое от поверхности земли до 0,2—0,3 км. Условиями, способствующими развитию инверсии, являются безоблачное небо и скорость ветра у поверхности земли не более 2—3 м/с.

2. Развитие радиационной инверсии в феврале начинается примерно с 18—19 ч, достигает максимума в 5—6 ч, около 8 ч инверсия быстро трансформируется. Продолжительность инверсионного периода составляет 13—14 ч.

3. В октябре в дневные часы до уровня 0,1—0,2 км наблюдается близкое к неустойчивой стратификации атмосферы состояние, а выше к 0,3—0,5 км — почти изотермическое состояние, часто переходящее в приподнятую инверсию.

4. Распределение влажности мало меняется с высотой, находясь в пределах 65—75% зимой, и 30—35% в октябре, что характеризует наличие в пограничном слое очень сухого воздуха. Следовательно, ухудшение видимости над карьером наблюдается при состоянии воздуха, далеком от насыщения.

5. Анализ турбулентного состояния в районе Аксая указывает на наличие интенсивной турбулентности, особенно в октябре, распространяющейся до уровня 0,2 км, а при сильных ветрах — до 0,4 км. Эта турбулентность вызвана большей частью динамическим фактором (большими вертикальными градиентами скорости ветра).

6. Анализ пульсаций температуры воздуха также указывает на наличие в октябре интенсивной турбулентности до уровня 0,3—

0,5 км со значительными горизонтальными смещениями. Выше слоя инверсии турбулентный обмен быстро затухает.

7. В октябре наблюдалось почти постоянное наличие плотной дымки в слое поверхность земли—0,5 км. Выше интенсивность дымки уменьшалась, но в 40% случаев плотная дымка сохранялась до уровня 1,5—2,0 км. В первом приближении мы считаем, что наличие плотной дымки во всем слое 1,5—2,0 км связано с макропроцессами и переносом пыли с юга и юго-запада Средней Азии. Этот процесс легко прогнозируется по синоптической карте. Запыленность только нижнего слоя (до уровня 0,5 км) больше связана с микропроцессами в районе Аксай и имеет локальный характер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов П. А. Методы аэрологических исследований пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1961. 221 с.
2. Воронцов П. А., Селицкая В. И. Методика аэростатного зондирования атмосферы. — «Тр. ГГО», 1955, вып. 51, с. 3—16.
3. Ледохович А. А., Зайцев В. А. Дистанционное измерение температуры и влажности воздуха с самолета. — «Тр. ГГО», 1956, вып. 63, с. 177—183.
4. Воронцов П. А., Селицкая В. И., Петрова Е. В. Вертикальное распределение температуры и влажности воздуха в Коркинском карьере. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 38—51.
5. Тюнякина Н. С. Вертикальное распределение температуры в атмосфере карьера. — «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 85—95.
6. Тюнякина Н. С. Особенности микроклимата карьера Аксай. — «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 120—127.

П. А. ВОРОНЦОВ, В. И. СЕЛИЦКАЯ, Е. В. ПЕТРОВА

## АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА В КАРЬЕРЕ АКСАЙ

Как показывают наблюдения, ветровые условия, особенно в разработанных карьерах, очень сложны и зависят от многих факторов, главными из которых являются: направление и скорость ветра над карьером, температурные условия внутри карьера, его геометрические характеристики, различия освещенности бортов и т. д.

Для исследования ветрового режима в районе карьера Аксай, расположенного в 135 км к северо-западу от г. Джамбула, применялся метод базисных шаропилотных наблюдений и наблюдений с одного пункта.

### Средние скорости ветра

Поскольку глубина карьера Аксай является относительно небольшой, всего 40—45 м, выпуски шаров-пилотов и подъем метеорографа по техническим причинам происходил не со дна карьера, а с одного из бортов. Таким образом, характеристики ветрового и термического режимов будут относиться в основном к слою, расположенному в верхней части карьера, и к слоям, лежащим над карьером.

В дальнейшем рассмотрение всего материала будем проводить по двум периодам: зимнему (декабрь—февраль) и осеннему (октябрь), с разделением на дневные и ночные часы (там, где имеется достаточное число наблюдений).

Средняя скорость ветра и его направление являются основной характеристикой ветрового режима района (табл. 1). Распределение скорости ветра и над карьером Аксай имеет целый ряд особенностей по сравнению с профилями ветра над равнинной местностью. Отмечается относительно быстрый рост скорости ветра зимой в самом нижнем слое, поверхность земли—50 м, и в октябре в слое поверхность земли—100 м как в дневные, так и в ночные часы, что указывает на торможение воздушного потока над карьером. Выше этих уровней наблюдается рост скорости ветра,

## Средние скорости ветра (м/с). Карьер Аксай, 1972 г.

	Высота, км																
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8

## Декабрь — февраль

День . . . . .	1,9	3,8	3,9	4,6	4,8	5,1	5,4	5,2	5,4	5,3	5,4	5,5	5,8	6,3	6,8	7,0	7,1	7,4
Ночь . . . . .	0,7	3,0	4,5	5,1	3,6	3,9	3,8	4,0	4,2	4,6	4,9	4,6	4,8	5,2	5,5	4,6	5,3	3,8
Среднее за сутки . . . . .	1,5	3,5	4,1	4,7	4,4	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,1	5,5	5,9	6,5	6,7	6,5	7,3
Число случаев . . . . .	117	96	115	115	120	121	119	117	112	110	106	103	96	86	67	57	49	39

## Октябрь

День . . . . .	4,0	5,3	6,8	7,5	8,0	8,7	8,7	8,2	7,9	7,4	7,5	8,3	8,7	8,6	9,0	9,7	10,3	—
Ночь . . . . .	3,6	4,9	6,2	7,4	7,5	8,2	8,6	9,9	10,1	10,3	11,6	9,6	7,7	5,7	—	—	—	—
Среднее за сутки . . . . .	3,9	5,2	6,6	7,5	7,9	8,6	8,8	8,7	8,5	8,2	8,4	8,6	8,5	7,9	8,0	8,5	7,9	—
Число случаев . . . . .	77	77	77	77	77	75	74	69	69	68	64	62	62	56	48	47	41	—

который по средним величинам имеет четко выраженный максимум в нижнем слое зимой в дневные часы на уровне 0,4 км, ночью на высоте 0,8 км при значениях  $v$  соответственно 5,4 и 4,9 м/с.

В октябре характерно общее возрастание скорости ветра во всем 2-километровом слое с первым максимумом скорости днем в слое 0,3—0,4 км ( $v \approx 8,7$  м/с), а в ночные часы на уровне 0,8 км ( $v = 11,6$  м/с) и быстрое уменьшение ее в вышележащих слоях. Вызвано это, очевидно, более активными аэросиноптическими процессами в октябре, наличием больших горизонтальных градиентов давления и температуры воздуха. В октябре при высоких температурах воздуха на юге Средней Азии и в северных районах Казахстана уже имеет место значительное выхолаживание, что создает большие значения барического и термического градиентов. Несовпадение направления геострофического и термического ветра, оче-

Таблица 2

Величины  $\Delta v = \frac{dv}{dz} \cdot 100$  м/с по средним значениям скорости. Карьер Аксай

	Слой, м								
	0—50	50—100	100—200	200—400	400—600	600—800	800—1000	1000—1400	1400—2000
Декабрь									
День . . . . .	3,8	0,2	0,9	0,3	0,0	0,0	0,2	0,25	0,10
Ночь . . . . .	4,6	3,0	-0,9	0,1	0,2	0,35	-0,05	0,20	—
Сутки . . . . .	4,0	1,2	0,3	0,2	0,05	0,1	0,2	0,25	0,13
Октябрь									
День . . . . .	2,6	3,0	1,2	0,35	-0,4	-0,2	0,6	0,1	0,2
Ночь . . . . .	2,6	2,6	1,3	0,55	0,75	0,75	-1,45	—	—
Сутки . . . . .	2,6	3,0	1,2	0,35	-0,4	-0,2	0,65	0,1	—

видно, и вызывает образование первого максимума скорости ветра на уровнях, указанных выше. В зимнее время имеет место более стационарное барическое поле с меньшими контрастами температуры и плотности воздуха, поэтому абсолютные значения скорости ветра меньше и максимум  $v$  выражен не так резко.

Такое распределение скорости ветра с большими значениями вертикальных градиентов в октябре показывает на относительную неустойчивость масс воздуха в слое 0,5—0,8 км.

Из анализа критерия Ричардсона следует, что устойчивость масс воздуха определяется так называемым термодинамическим вертикальным градиентом  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \gamma + \gamma_d,$$

представляющем сумму вертикального градиента температуры  $\gamma$

и ветрового эквивалента вертикального градиента температуры  $\gamma_d$ :

$$\gamma_d = \frac{T}{g} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2.$$

Как видно из табл. 2, в октябре в дневные часы имеет место значительное возрастание  $\Delta v = -\frac{\partial u}{\partial z}$ , что соответствует повышенной неустойчивости нижних слоев атмосферы над карьером, а следовательно, и частой запыленности атмосферы в карьере вследствие интенсивного перемешивания воздуха.

Наибольший интерес представляют розы ветров за октябрь (рис. 1). На всех уровнях в слое до 500 м наблюдается резкое

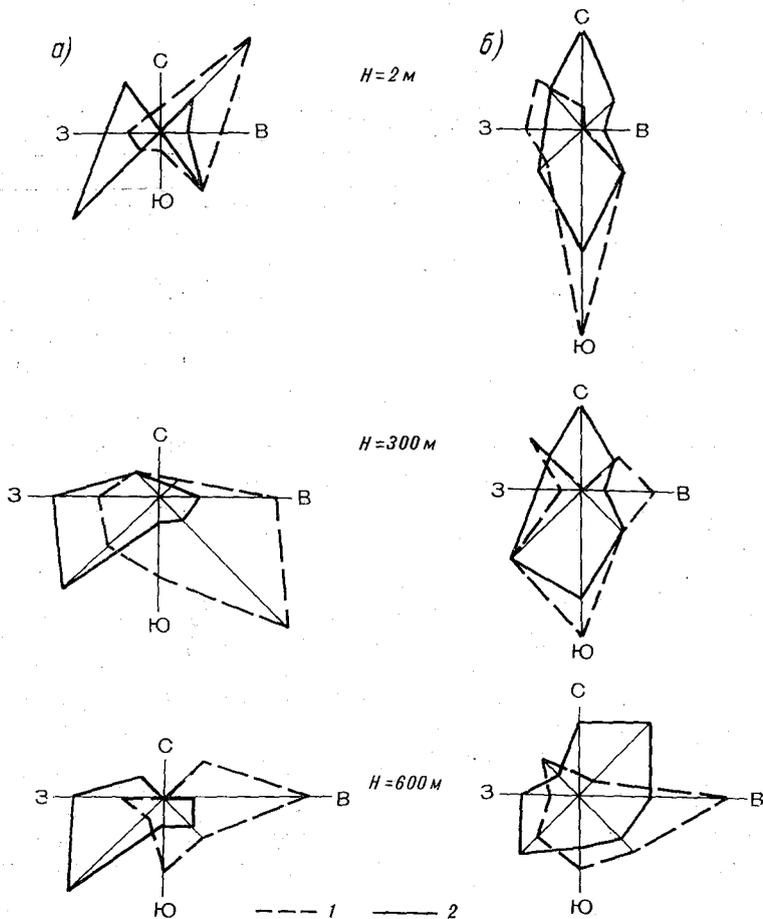


Рис. 1. Розы ветров по высотам в карьере Аксай (а) и Джамбуле (б).

1 — январь — февраль; 2 — октябрь.

преобладание юго-западных и западных ветров, причем ветры преобладающих направлений имеют максимальные скорости. Юго-западный перенос в октябре отчетливо просматривается по результирующему ветру (табл. 3).

В зимний период имеет место несколько иной процесс. Преобладающими в слое 0—500 м становятся ветры восточных и юго-восточных направлений, однако максимальные скорости приходятся по-прежнему на юго-западные и западные направления ветра. Если в октябре тормозящая роль карьера сравнительно невелика, то в зимний период у бровки преобладающее направление ветра близко к оси карьера.

Таблица 3

Результирующий ветер. Карьер Аксай

Период	Высота, м											
	0		100		200		300		500		800	
	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>	<i>d</i>	<i>v</i>
X	233	2,5	249	3,8	235	3,5	236	4,4	233	5,2	232	6,4
XII—II	105	0,5	163	2,6	168	1,6	138	2,1	146	1,8	184	1,6

Для более детального анализа особенностей ветрового режима рассмотрим распределение ветра с разбивкой по градациям скорости на уровне 2 м на четыре группы (табл. 4). В группу I войдут случаи со скоростью от 0 до 3 м/с, в группу II—от 3,1 до 6,0 м/с, в группу III—от 6,1 до 9,0 м/с, в группу IV—больше 9,0 м/с.

При слабых скоростях ветра как в октябре, так и в январе—феврале имеет место более или менее равномерное возрастание скорости ветра во всем 2-километровом слое, с несколько большими абсолютными величинами *v* в октябре начиная с уровня 200—300 м. С усилением ветра у поверхности земли начинается более быстрый рост *v* в нижнем слое, до высоты 200—400 м, с последующим уменьшением скорости, причем чем больше скорость ветра у поверхности земли, тем на большую величину уменьшается абсолютная величина *v* выше слоя максимума. Например, в октябре при ветрах более 9 м/с максимум *v*=16,0 м/с имеет место на высоте 100 м, а на высоте 500 м *v*=6,2 м/с. Такие большие вертикальные градиенты скорости ветра создают над карьером повышенную термодинамическую неустойчивость, вызывающую образование пыльных бурь с резким ухудшением видимости, что часто и имело место в период работы экспедиции.

Поскольку глубина карьера Аксай небольшая, роль самого карьера относительно мала в деформации ветрового режима в слое 200—300 м. На рис. 2 дано распределение *v* по тем же градациям в Коркинском карьере, глубина которого составляет

Таблица 4  
Значения  $\varnothing$  м/с с разбивкой по градациям скорости у поверхности земли. Карьер Аксай, 1972 г.

Градация, м/с	Число случаев	Высота, км																
		0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
Декабрь—февраль																		
0—3,0	95	1,0	2,9	3,3	3,6	3,8	4,4	4,5	4,7	4,8	4,7	4,9	4,9	5,2	6,1	6,4	6,4	6,0
3,1—6,0	10	4,0	5,3	6,7	7,4	6,9	7,1	6,9	6,6	6,3	5,7	4,9	5,2	5,6	6,3	6,9	8,4	9,0
6,1—9,0	2	9,0	8,0	11,1	11,1	11,2	6,9	8,8	8,4									
>9,0																		
Октябрь																		
0—3,0	34	1,9	2,7	3,4	4,2	4,8	5,3	6,3	7,3	7,7	8,1	8,4	8,7	8,9	9,1	9,7	10,4	9,7
3,1—6,0	29	4,8	6,3	7,7	8,4	9,0	10,0	9,5	8,8	8,6	8,7	9,2	10,2	10,1	8,3	7,2	6,8	5,5
6,1—9,0	12	6,4	8,6	11,2	12,8	12,8	13,4	13,5	12,2	10,6	7,4	6,6	5,5	4,8	4,2	3,1	4,7	6,6
>9,0		8,3	9,3	16,0	15,0	15,0	13,5	7,6	6,2	7,6	7,4	8,8	6,0					

350 м. Здесь хорошо выделяется резкое ослабление ветра в самом карьере, особенно при больших скоростях.

Для характеристики ветрового режима не только в районе карьера Аксай, но и на большей площади проведено сопоставление результатов шаропилотных наблюдений с материалами радиоветровых наблюдений в Джамбуле. Расстояние между этими пунктами составляет 135 км.

В первую очередь рассмотрим розы ветров и результирующий ветер на этих двух пунктах за январь — февраль и октябрь. Если в октябре у земной поверхности в Джамбуле преобладающими являются южные ветры и отчасти северные (см. рис. 1), то на

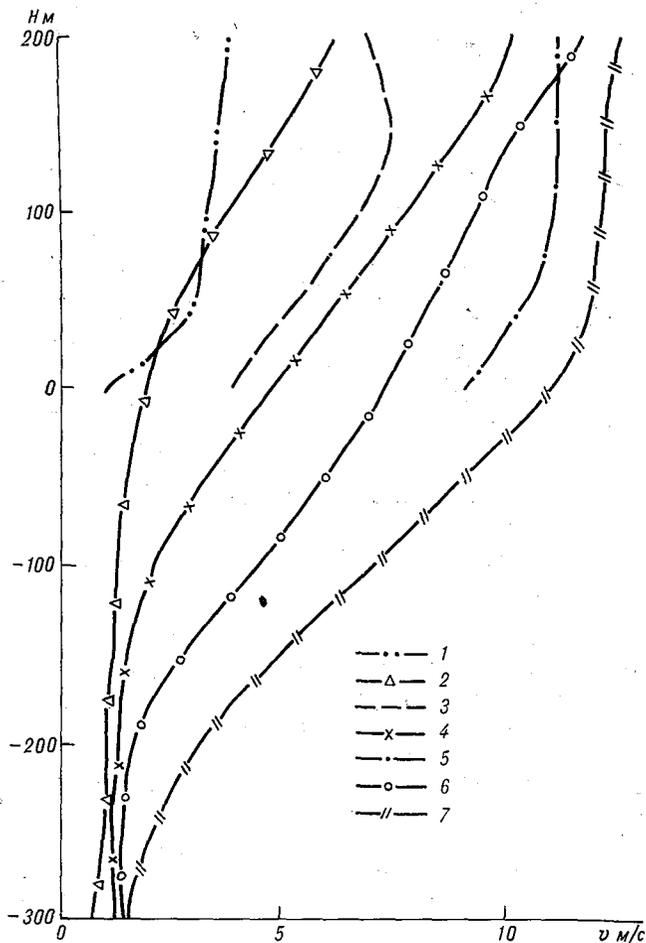


Рис. 2. Сопоставление профилей ветра в карьерах Аксай (1, 3, 5) и Коржинский (2, 4, 6, 7) по градициям  $v$  у поверхности земли (холодный период).

1, 2) 0—3,0 м/с; 3, 4) 3,1—6,0 м/с; 5, 6) 6,1—9,0 м/с; 7) >9,0 м/с.

высотах 300 и 600 м увеличивается повторяемость юго-западных и западных направлений, а на 900 м господствующими являются, помимо юго-западных и западных ветров, северо-восточные, восточные и юго-восточные. Здесь, как правило, преобладающие направления характеризуются и большими скоростями. В Аксае на всех уровнях в слое до 500 м наблюдается резкое преобладание юго-западных и западных ветров с максимальными скоростями.

В зимнее время также имеются различия в средних характеристиках направлений ветра, особенно в нижнем 300-метровом слое, выше эти различия несколько сглаживаются.

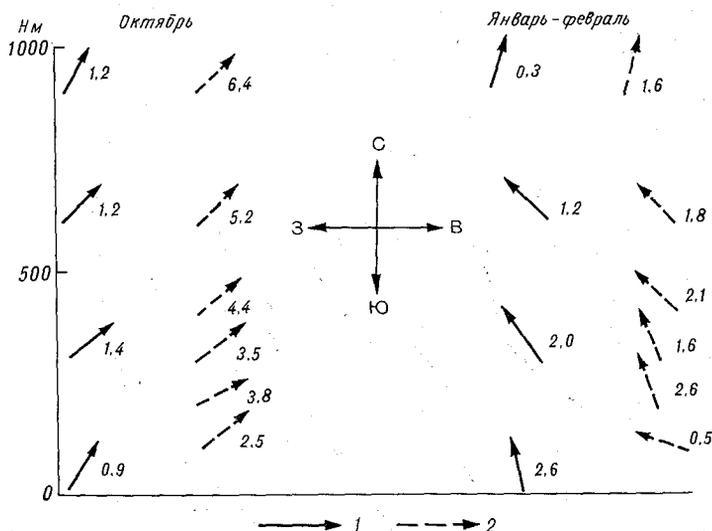


Рис. 3. Результирующий ветер в районе Джамбула и карьера Аксай.

1 — Джамбул, 2 — карьер Аксай.

Более отчетливо различия в направлениях ветров на этих двух пунктах проявляются в распределении результирующего ветра (рис. 3). Направление господствующего переноса в Аксае и Джамбуле в слое до 1000 м имеет почти одинаковое направление как в октябре, так и в январе — феврале. Наибольшие различия в скоростях результирующего ветра наблюдаются в октябре. Над Аксаем скорость результирующего ветра в 3—5 раз больше и растет с высотой. Этот факт указывает, что в октябре над Аксаем, несмотря на сравнительно близкое расстояние от Джамбула, микросиноптические процессы имеют несколько иной характер, уловить особенности которого на синоптической карте не представляется возможным. Вероятно, на мезо- или макросиноптические условия накладываются особенности орографии, которые могут вызвать такие различия в результирующем ветре в октябре.

## Сильные ветры в районе карьера Аксай

Большой интерес представляет рассмотрение условий образования сильных ветров в районе горно-химического комбината в Каратау, поскольку они оказывают значительное отрицательное влияние на выполнение производственного процесса, создавая резкое ухудшение видимости вследствие образования пыльных бурь.

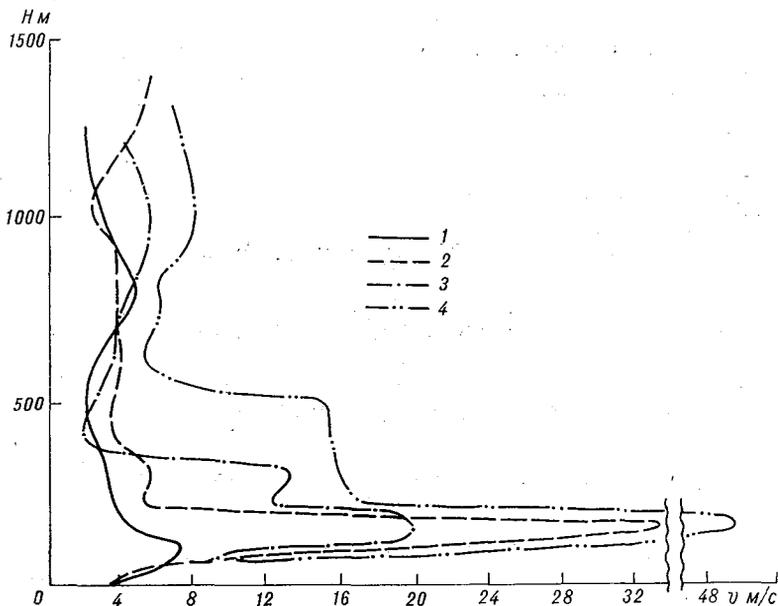


Рис. 4. Профили средней скорости ветра 12 февраля 1972 г.  
Карьер Аксай.

1—02 ч, 2—03 ч, 3—04 ч, 4—05 ч.

В 1972 г. в феврале сильные ветры наблюдались 7—8 и 12—13 числа, в октябре 7—8 и 27—29 числа. К сожалению, скорости ветра были настолько велики, что шар-пилот быстро уносило за горизонт и наблюдения приходилось прекращать.

Удалось проследить начало сильного ветра только 12 февраля. На рис. 4 приведены профили скорости ветра  $v$  в м/с за четыре срока: 02, 03, 04 и 05 ч. Здесь имел место быстрый рост скорости ветра южного направления с 4—6 м/с (в 02 ч) до 33 м/с (в 03 ч) в слое 0—150 м, с последующим небольшим ослаблением до 21 м/с (в 04 ч) и снова бурным ростом в течение часа до 54 м/с на том же уровне, 150—200 м. Направление ветра менялось сравнительно мало, причем некоторый поворот ветра, примерно на 90—120°, имел место выше уровня максимума  $v$ . В этом случае имело место образование типичной мезоструи в пограничном слое.

Синоптические условия в районе карьера Аксай с наличием сильных ветров были следующие:

В период 7—8 февраля 1972 г. в юго-западные районы Казахстана сместился прикаспийский циклон с атмосферным давлением в центре (район Кзыл-Орды) около 1015 мб. Увеличение скорости ветра в районе карьера Аксай до 17 м/с вызвано про-

Таблица 5  
Некоторые метеорологические характеристики в районе карьера Аксай

Дата	Суточные изменения температуры				Ветер				Максимальная скорость ветра, м/с	Атмосферные явления
	минимальные		максимальные		03 ч	09 ч	15 ч	21 ч		
	от	до	от	до						
7 II 1972	-17,8	-12,6	-3,3	3,6	00	☞	☞	☞	17	* $\nabla$ 6 <sup>36</sup> —8 <sup>30</sup> , 10 <sup>06</sup> —10 <sup>18</sup> $\nabla$ 11 <sup>12</sup> —11 <sup>24</sup> ☞0 <sup>12</sup> —10 <sup>30</sup> , ☞10 <sup>30</sup> —11 <sup>24</sup>
8 II	-12,6	-11,8	3,6	-1,9	☞	☞	☞	☞	20	
12 II	-19,1	-14,5	-6,4	-5,5	☞	☞	☞	☞	20	
13 II	-14,5	-10,9	-5,5	-5,4	☞	☞	☞	00	10	
7 X	1,9	2,5	17,1	27,3	00	☞	☞	☞	17	-S > 10— 10 <sup>48</sup> —13
8 X	2,5	7,4	27,3	25,5	☞	☞	☞	☞	10	$\nabla$ 22 <sup>12</sup> — 22 <sup>36</sup> —13 <sup>6</sup>
27 X	5,0	10,5	23,3	24,4	☞	☞	☞	00	12	
28 X	10,5	5,9	24,4	25,4	00	☞	☞	☞	28	-S > 10 <sup>48</sup> — 11 <sup>36</sup> 15 <sup>24</sup> —17 <sup>24</sup>
29 X	5,9	8,4	25,4	22,8	☞	☞	☞	☞	12	

хождением через этот пункт холодного фронта, который сопровождался снегопадами и метелями.

В период 12—13 февраля 1972 г. погоду на юге и юго-востоке Казахстана определяла тыловая часть ложбины циклона, центр которого находился в районе Колпашево. Контрасты температуры между теплой и холодной воздушными массами были порядка 8—10°C. Усиление ветра до 20 м/с 12 февраля в районе карьера Аксай обусловлено прохождением холодного фронта.

В период 7—8 октября 1972 г. погоду на юге Западной Сибири, Западного и Южного Казахстана обуславливал глубокий циклон с центром в районе Челябинска (давление около 975 мб). В районе карьера Аксай атмосферное давление на оси ложбины, связанной с указанным циклоном, было около 1005 мб. Контраст температуры между теплой и холодной воздушными массами достигал 15—18°C. Наличие спаренной системы полярного и арктического фронтов обусловило пыльные бури на большей части Средней Азии и в южных районах Казахстана. Сильный ветер (17 м/с) в районе карьера Аксай возник в теплом секторе циклона при приближении полярного фронта.

В период 27—29 октября 1972 г. в районе Джезказгана смещался прикаспийский циклон с давлением в центре около 1004 мб. С указанным циклоном связана система спаренных фронтов с контрастом температуры между холодной и теплой воздушными массами около 10°C. Резкое усиление ветра до 28 м/с в районе карьера Аксай 28 октября наблюдалось в теплом секторе при приближении полярного фронта.

В табл. 5 представлены некоторые метеорологические характеристики в районе карьера Аксай по наблюдениям за четыре срока. Как видно, во всех случаях наблюдался юго-западный ветер, сопровождавшийся в октябре пыльными бурями, ливневыми дождями, а в феврале метелями со снегопадом и ливневыми дождями.

Развитие сильных ветров было обусловлено прохождением теплого или холодного фронтов с большими термическими контрастами воздушной массы. К сожалению, в этих случаях из-за сильного ветра выпуски радиозондов в Джамбуле не производились, не было также и самолетного зондирования, поэтому детально характеризовать термический режим в периоды сильных ветров не представляется возможным. Однако по аналогии с исследованиями струйных течений в других районах можно утверждать, что во всех случаях имеет место инверсия температуры воздуха вблизи максимума скорости ветра. На усиление скорости ветра в струе большое значение оказывает также топография местности, которая обуславливает сжатие воздушного потока и при благоприятных аэросиноптических условиях создает локальный характер струи.

Следовательно, наличие инверсионного, своего рода запирающего слоя на уровне 150—300 м препятствует распространению пыли в верхние слои и создает повышенные ее концентрации у поверхности земли и в нижних слоях атмосферы, отрицательно отражаясь на производственном процессе открытых горных работ.

Таким образом, анализ проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. Деформация ветрового режима воздушного потока над карьером Аксай, судя по профилю средней скорости ветра, распространяется на сравнительно небольшой слой воздуха: в ок-

тябре до 100 м, зимой до 50 м днем и до 100 м ночью. С ростом скорости ветра слой деформации воздушного потока несколько возрастает.

2. В октябре на всех уровнях в слое до 0,5 км наблюдается резкое преобладание юго-западных и западных ветров, причем ветры этих направлений имеют и максимальную скорость.

3. Интенсивность юго-западного переноса в октябре особенно отчетливо просматривается по результирующему ветру. В зимний период наблюдаются ветры восточного и юго-восточного направлений, но максимум скорости приходится на юго-западное и западное направления.

4. При слабых ветрах (до 3 м/с) в оба периода имеет место более или менее равномерное возрастание скорости ветра в 2-километровом слое. С усилением ветра начинается более быстрый рост скорости до высоты 0,2—0,4 км, а затем ее уменьшение. Причем, чем больше скорость ветра, тем на большую величину уменьшается абсолютная скорость выше слоя максимума.

5. В районе карьера Аксай относительно часто наблюдаются сильные ветры, исследование которых представляет практический интерес, поскольку они создают резкое ухудшение видимости вследствие образования пыльных бурь и «сухих» смогов, отрицательно сказывающихся на производственных процессах.

6. Профили сильного ветра характеризуются резким возрастанием скорости от поверхности земли до уровня 0,15—0,2 км (до 45 м/с и более), с последующим ослаблением. Направление ветра при этом меняется сравнительно мало. Характерным является сравнительно быстрое по времени развитие процесса усиления скорости ветра.

7. Во всех случаях имеет место образование типичной мезоструи с резким ростом скорости ветра к оси струи и ослаблением выше ее при ветрах южного и юго-западного направлений.

8. Развитие сильных ветров в районе карьера Аксай обусловлено прохождением теплого или холодного фронта с большими термическими контрастами (порядка 10—12°С).

9. На усиление ветра в струе оказывает большое влияние орografia местности, которая обуславливает сжатие воздушного потока и создает локальный характер струи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов П. А. Методы аэрологических исследований пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоздат, 1961. 221 с.
2. Михель В. И. Вопросы методики шаропилотных наблюдений, их обработка и практическое применение. Л., Гидрометеоздат, 1959, 226 с.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. 2, вып. 4. Л., Гидрометеоздат. 1958. 93 с.
4. Воронцов П. А., Курпакова Т. А., Честная И. И. О турбулентности и вертикальных токах воздуха в Коркинском угольном карьере в дневные часы. В кн.: Воздухообмен и микроклимат в карьерах. Челябинск, изд. НИИОГР, 1969, с. 54—65.

5. Рыбаков Е. Т., Ахметов М. С. Точность определения ветра в атмосфере методом радиолокации. — «Тр. ГГО», 1968, вып. 226, с. 116—124.
6. Новожилов Н. И. Тропосферные мезоструи. — «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1961, № 2, с. 334—336.
7. Цвєрава В. Г. Струйные течения в пограничном слое атмосферы. — «Метеорология и гидрология», 1967, № 10, с. 71—75.
8. Чайышева С. Г. Местные ветры Средней Азии. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 120 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛИТЕЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В КАРЬЕРЕ АКСАЙ

В работе дан обобщенный анализ метеорологической обстановки на примере трех основных метеозлементов: ветра, температуры и влажности воздуха, осредненных за 5 лет наблюдений, с апреля 1968 г. по апрель 1973 г. Такой ряд наблюдений позволяет получить четкую картину хода различных метеозлементов независимо от аномальностей отдельных лет и использовать их для разработки оперативного прогноза нарушений естественного воздухообмена, накопления и рассеяния вредных примесей в атмосфере карьера, а также поиска возможных путей технического развития и оптимизации средств искусственного проветривания.

### Ветровой режим

Режим ветра в Аксае определяется в основном местными барико-циркуляционными условиями. В холодное время года ветровой режим района складывается под влиянием сибирского антициклона, его западного отрога. Поэтому довольно часто отмечаются штили. В летний период ярко проявляется преобладающий вынос воздушных масс с севера. В это время какие-либо преобладающие по направлению ветры слабо выражены, что обусловлено размытым барическим полем. Но географическое положение Аксайской долины, наличие местных потоков создают четкие северо-восточное и юго-западное направления ветра в течение всего года — с преобладанием каких-либо составляющих в зависимости от сезона. В свою очередь, вытянутость карьера создает направление ветра вдоль длинной оси с преобладанием северо-западных и юго-восточных ветров (рис. 1, табл. 1), а вариация его направлений обуславливается также влиянием местных потоков. Механизм развития местных потоков связан с неравномерным нагревом бортов и определяет их направление от более холодных бортов к более теплым [1].

В дневное время на дне карьера преобладают северо-западные ветры, в ночное — юго-восточные, что зависит от распределения и изменения барического поля местности (рис. 1). Наибольшие по величине скорости характерны для юго-западных и западных ветров. Они резко проявляются в периоды прохождения и обострения фронтов.

Здесь интересно привести сравнение данных станции, расположенной в горной области (Аксай), с данными ближайшей равнин-

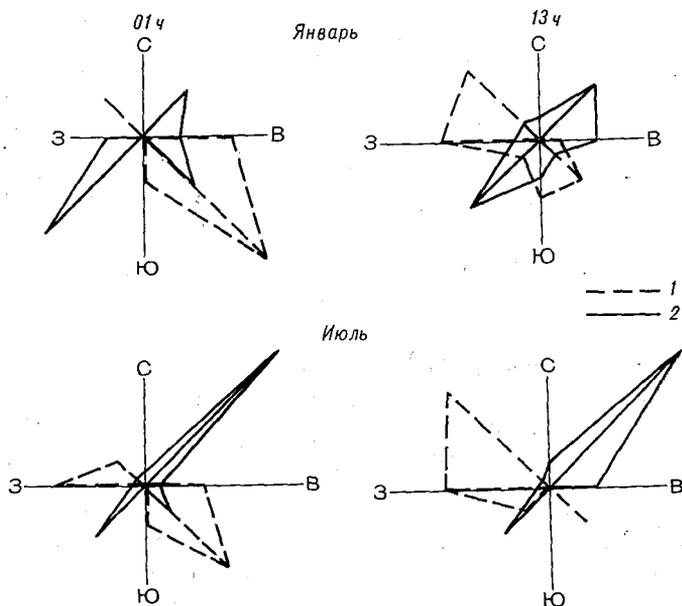


Рис. 1. Повторяемость направлений ветра по данным пятилетних наблюдений на дне (1) и поверхности (2) карьера в ночное и дневное время.

ной метеостанции Джамбул для возможного использования последних для Аксай. (Аксай находится в 135 км к северо-западу от Джамбула.). Для сравнения возьмем наиболее теплый месяц — июль и наиболее холодный — январь (табл. 2).

В Джамбуле преобладают ветры южных направлений зимой и северных — летом, что определяется закономерностями общей барической циркуляции района, в то время как в Аксае влияние Аксайской долины дает преобладание северо-восточных и юго-западных ветров в течение всего года.

Для детальной характеристики ветрового потока в карьере, скорость и направление которого обусловлены изменениями самого поверхностного потока под влиянием неровностей земной поверхности и действия термической стратификации, проводились непрерывные производственные измерения. В результате получен

Таблица 1

**Повторяемость (число случаев) направлений ветра по данным  
пятилетних наблюдений**

Месяц	Место измерения	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Всего
I	К	48	10	140	798	182	119	388	388	2073
	П	34	361	628	231	298	552	342	77	2523
IV	К	31	16	103	622	330	91	570	670	2433
	П	142	542	617	170	158	424	272	146	2471
VII	К	67	18	120	471	222	157	1154	1177	3386
	П	280	767	507	115	226	569	483	287	3234
X	К	76	38	266	681	215	147	701	912	3036
	П	93	524	544	124	261	788	434	76	2844

Примечание. Здесь и в табл. 3 и 4 К — дно карьера, П — поверхность карьера.

годовой ход наблюдений. Наряду с наблюдениями за скоростью ветра по ручному анемометру на высоте 2 м одновременно фиксировалась скорость на высоте 10 м по анеморумбографу М-12.

Распределение скорости ветра в Аксае в течение года (рис. 2) имеет два максимума: один — в апреле, выражен весьма резко, второй — в октябре, проявляется более слабо. Соответственно отмечается и два минимума: более характерный — в январе и довольно размытый — в летний период. На высоте 2 м от поверхности почвы весенний средний максимум скорости ветра, который составляет 2,7 м/с на дне карьера и 4,4 м/с на поверхности, обусловлен увеличением градиентов барического поля, связанных с началом перестройки зимнего режима на летний и активизацией

Таблица 2

**Сравнение повторяемости (%) направлений ветра по восьми румбам  
для станций Аксай (поверхность карьера) и Джамбул**

Станция	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
<b>Январь</b>								
Аксай . . . . .	1,0	14,0	25,0	9,0	12,0	22,0	14,0	3,0
Джамбул . . . . .	8,0	10,0	8,0	14,0	20,0	27,0	9,0	4,0
<b>Июль</b>								
Аксай . . . . .	9,0	23	16	3	7	18	15	9,0
Джамбул . . . . .	21,0	17	9	5	10	2	13	23,0

циклонических процессов. Уменьшение скорости ветра летом связано с окончанием сезонной перестройки барического поля, его ослаблением и резким уменьшением барических градиентов. Минимум средней скорости зимой связан с тем, что в Аксайской долине барические градиенты занижены за счет орографического антициклогенеза, застаивания притекающих с севера масс воздуха и развития вдоль гор зимних инверсий, обуславливающих устойчивость приземных слоев атмосферы. Средние минимальные скорости равны 1,4 м/с на дне карьера и 3,1 м/с на поверхности. Средняя годовая амплитуда скорости ветра, осредненная за 5 лет, составляет 0,8 м/с на дне карьера и 1,3 м/с на поверхности.

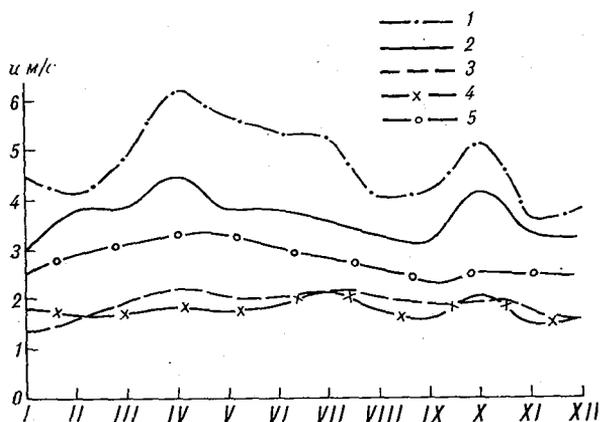


Рис. 2. Годовой ход скорости ветра на поверхности (1, 2) и дне (3, 4) карьера на высотах 2 и 10 м по данным пятилетних наблюдений и на ст. Джамбул (5)

2, 3)  $H=2$  м; 1, 4)  $H=10$  м.

На рис. 2 представлен также годовой ход скорости ветра на дне и поверхности карьера, измеренный на высоте 10 м от поверхности почвы и осредненный за 5 лет.

Кривые годового хода скорости ветра на высотах 2 и 10 м близки по характеру, особенно для поверхности, где отчетливо проявляются максимум в апреле и большая абсолютная величина, порядка 6,3 м/с (на дне 2,2 м/с); минимум скорости на дне 1,6 м/с, на поверхности 3,6 м/с. Средняя годовая амплитуда составляет 0,7 м/с на дне и 2,7 м/с на поверхности.

Сравнивая суточный ход скорости ветра на высотах 2 и 10 м, можно заметить, что на дне карьера значения скорости почти одинаковы, причем на высоте 10 м из-за особенностей распределения скоростей ветра с высотой в карьере — рециркуляционной схемы проветривания и термических потоков — абсолютные величины в теплый период меньше, чем на высоте 2 м.

Таблица 3

Суточный ход скорости ветра ( $u$ ), повторяемости штилей ( $N$ ), температуры ( $t$ ) и относительной влажности ( $f$ ) воздуха, осредненный за 5 лет

Метео-элемент	Месяц	Место измерений	Часы								
			01	04	07	10	13	16	19	22	
$u$ м/с	I	K	0,9	1,2	1,3	1,5	2,0	1,6	1,2	1,2	
		П	2,9	2,9	2,9	3,3	4,0	3,5	2,7	2,6	
	IV	K	2,0	1,8	1,6	2,1	2,8	2,7	2,6	2,0	
		П	4,7	4,7	3,5	4,1	4,9	5,2	4,9	4,3	
	VII	K	1,4	1,2	1,2	1,8	3,1	3,1	3,1	1,9	
		П	2,7	2,8	3,1	3,4	4,4	4,5	4,3	3,0	
	X	K	1,5	1,3	1,3	1,8	2,8	3,0	2,0	1,8	
		П	3,6	3,7	3,4	3,4	4,8	5,5	4,1	4,0	
	$N$ %	I	K	52	54	49	47	27	35	42	50
			П	28	36	35	27	17	18	31	26
IV		K	15	26	23	15	5	6	6	13	
		П	12	15	25	7	2	4	5	9	
VII		K	31	37	41	10	1	1	1	20	
		П	17	16	18	6	1	0	3	8	
X		K	31	38	42	25	2	3	16	30	
		П	7	16	17	10	0	0	8	12	
$t$ °C		I	K	-9,2	-9,7	-9,7	-9,2	-6,3	-6,6	-7,8	-8,7
			П	-10,0	-10,7	-10,6	-8,6	-6,6	-7,0	-8,0	-8,6
	IV	K	8,8	8,0	7,4	10,0	12,4	13,9	13,1	11,2	
		П	8,4	7,5	7,5	10,1	12,2	13,5	12,8	11,9	
	VII	K	23,2	21,3	20,2	24,7	27,9	29,2	28,9	26,0	
		П	22,8	21,2	20,2	24,9	28,0	29,1	28,5	25,4	
	X	K	8,9	7,8	7,1	9,6	12,9	14,2	12,4	10,0	
		П	8,9	8,0	7,5	9,6	12,7	13,9	12,0	9,9	
	$f$ %	I	K	70	69	72	69	66	68	70	71
			П	69	68	72	70	67	66	72	73
IV		K	68	71	72	65	58	54	58	66	
		П	72	74	76	67	61	57	60	67	
VII		K	35	37	41	32	25	23	22	28	
		П	33	37	38	30	23	21	21	27	
X		K	51	54	57	50	39	35	42	48	
		П	50	52	53	50	40	37	42	48	

Для естественного воздухообмена в карьере показательным является суточный ход скорости ветра (табл. 3). Из-за резкой континентальности климата суточный ход в Аксае выражен довольно четко. Вследствие изменяющейся в течение суток интенсивности турбулентного обмена происходит перераспределение количества движения между слоями и наблюдается соответствующий ветровой режим: днем с увеличением термической неустойчивости усиливается турбулентный обмен, в нижние слои увеличивается приток более быстро движущихся частиц с верхних уровней. По этой причине скорость ветра быстро возрастает в нижнем слое. Скорость ветра на дне карьера ( $u_k$ ) практически во все сроки меньше скорости на поверхности ( $u_{\text{п}}$ ), так как нижняя часть карьеров расположена либо в сфере действия прямых потоков свободной струи, за пределами области постоянных скоростей, либо в зоне обратных потоков, за пределами внешних границ свободной струи. Исключением являются случаи малых скоростей ветра на поверхности, когда местные потоки приобретают главенствующее значение и  $u_k > u_{\text{п}}$ .

Таблица 4

Среднегодовая амплитуда изменения скорости ветра

Место измерения	Высота, м	
	2	10
К	0,80	0,66
П	1,42	2,53

Минимальное значение скорости ветра в суточном ходе наблюдается в ранние утренние часы, максимальное — в дневное время суток и часто совпадает с дневным максимумом температуры. Амплитуды в суточном ходе изменяются от 1,2 м/с на дне карьера и 1,4 м/с на поверхности в январе до 1,9 и 1,8 м/с соответственно в июле. Это изменение амплитуды скорости ветра в течение года находится в соответствии с теорией суточного хода скорости ветра, в основе которой лежит суточный и годовой ход коэффициента турбулентности [2].

Наибольшие по величине ветры на поверхности наблюдались в октябре, наименьшие — в январе. По среднемесячным данным, скорость ветра в Аксае в течение всего года выше, чем в Джембуле, на 0,8 м/с (рис. 2).

Более четко суточный ход скорости ветра на поверхности выражен на высоте 10 м. Среднегодовая амплитуда изменения скорости на высоте 10 м на дне карьера меньше, а на поверхности больше, чем на 2 м (табл. 4).

Факт большей скорости ветра на высоте 2 м по сравнению с 10 м — результат рециркуляционной схемы проветривания карьера, которая характеризуется зоной обратных потоков, а следовательно, и зоной затишья, когда происходит дополнительная деформация потоков по мере сокращения высоты с соответствующим перераспределением скоростей в карьере.

В пасмурные дни приток тепла определяется только рассеянной радиацией, которая равномерно распределяется по всему

карьерному пространству, при наличии солнца тепловой поток определяется в основном прямой солнечной радиацией с соответствующим возникновением температурных неоднородностей в пределах поверхности карьера и развитием местных воздушных потоков. С увеличением скорости ветра на поверхности суточный ход относительной скорости существенно сглаживается, что говорит о снижении роли местных потоков при сильных ветрах. Уменьшение скорости ветра на поверхности приводит к сокращению скорости в карьере и изменяет ее относительные величины.

Если рассмотреть повторяемость различных скоростей ветра по градациям, то можно отметить, что случаи сильных ветров в карьере очень редки и составляют 1—1,5% в дневные часы, а в летние месяцы полностью отсутствуют. В марте повторяе-

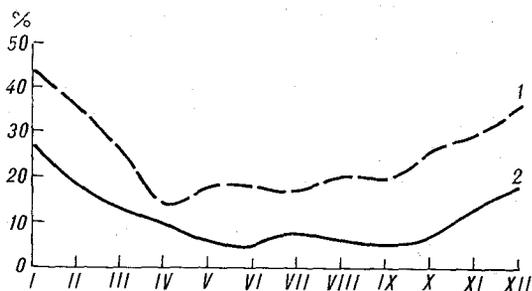


Рис. 3. Годовой ход повторяемости (%) штилей на дне (1) и поверхности (2) карьера по данным пятилетних наблюдений.

мость скоростей ветра более 18 м/с составляет 5—7%. На поверхности ветры более 18 м/с встречаются в 2 раза чаще. Наиболее часто на дне карьера фиксируются ветры скоростью 0—2 и 2—5 м/с, причем последние отмечаются в основном в дневное время летом.

Для изучения условий проветривания карьеров определенный интерес представляет рассмотрение повторяемости штилей (от 0 до 0,5 м/с). В период с 1968 по 1972 г. (рис. 3), по средним данным, наибольшее число штилей наблюдалось в январе (на дне карьера 44% случаев, на поверхности примерно 27%), а наименьшее на дне карьера (14%) в апреле, на поверхности (около 5%) в июне.

В суточном ходе наибольшее число штилей приходится на 3—6 ч, минимум — на 12—15 ч, а в июле и октябре в эти же сроки на поверхности вообще не наблюдалось штилевой погоды. Почти во всех случаях наблюдений число штилей на поверхности в 2 раза меньше, чем на дне.

Анализ ветрового режима позволяет сделать следующие выводы.

1. Режим ветра в карьере Аксай определяется в основном местными барико-циркуляционными условиями, т. е. характерное для всего района направление ветра: зимой — южное, а летом — северное (на примере ст. Джамбул), преломляется в Аксайской долине на четкое северо-восточное и юго-западное направления в течение всего года, а вытянутость карьера создает направление ветра вдоль длинной оси карьера с преобладанием северо-западных и юго-восточных ветров.

2. В результате влияния рельефа местности годовой ход средних значений скорости ветра имеет два максимума (более резкий в апреле и слабый в октябре) и два минимума (более резкий в январе и слабый в июне).

3. Скорость ветра на дне карьера меньше скорости на поверхности и составляет в среднем летом 0,5 и зимой 0,4 скорости на поверхности.

4. Вследствие формирования зоны рециркуляции скорость ветра на высоте 2 м больше, чем на 10 м.

5. Наибольшее число штилей наблюдается в январе в ранние утренние часы.

### Температура воздуха

Термический режим Аксая определяется совокупностью радиационных факторов и влиянием циркуляции атмосферы (вынос холодных и теплых масс воздуха).

Отдаленность морей и океанов создает большие контрасты сезонных и годовых колебаний температуры, значительные суточные и годовые амплитуды. Среднегодовая амплитуда температуры воздуха (от самого холодного месяца — января к самому жаркому — июлю) составляет 33,5°C (средняя за 5 лет наблюдений).

Благодаря особенностям барико-циркуляционных условий и преобладанию положительных значений радиационного баланса в годовом цикле длительность теплого периода составляет около 8 месяцев (с марта по ноябрь), а среднегодовая температура воздуха Аксая равна 9,9°C.

Зима в Аксае неустойчивая и мягкая, среднемесячные температуры воздуха колеблются от -14 до 1°C. Январь — самый типичный холодный зимний месяц. Средняя многолетняя температура составляет -8,3°C. В суточном ходе температура воздуха в январе имеет правильный ход с минимумом в ранние утренние часы и максимумом в полдень, но суточная амплитуда очень мала и составляет 3,4°C, это более чем в 2 раза меньше амплитуд в другие сезоны года, что объясняется резким сокращением радиационного баланса и преобладанием числа пасмурных дней в этот период.

Наибольшее увеличение среднемесячной температуры воздуха наблюдается от марта к апрелю, в среднем на 9°C. Это повышение связано с увеличением продолжительности солнечной радиа-

ции и значительной перестройкой барико-циркуляционных условий. Лето — жаркое, продолжительное, среднесуточные температуры воздуха с июня по август меняются очень мало, в среднем на  $1,5^{\circ}\text{C}$  за месяц, что имеет определенное значение в формировании умеренно засушливых типов погоды. Июль — самый жаркий месяц, его средняя многолетняя температура составляет  $25,2^{\circ}\text{C}$ , средняя суточная амплитуда равна  $9^{\circ}\text{C}$ .

Из сравнения среднемесячных температур в Аксае и на ближайшей равнинной станции Джамбул видно, что температуры воздуха в Джамбуле с января по май выше, чем в Аксае, а с мая по декабрь ниже, наибольшие различия около  $3,3^{\circ}\text{C}$  отмечены в январе, наименьшие ( $0,4^{\circ}\text{C}$ ) — в мае (рис. 4). Такое распре-

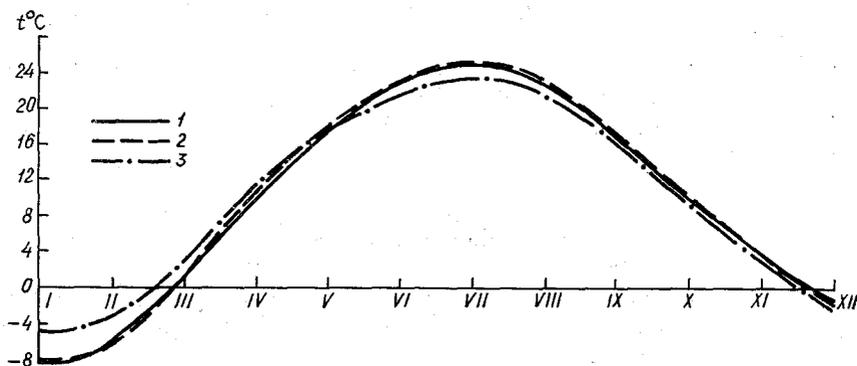


Рис. 4. Годовой ход температуры воздуха на поверхности (1) и дне (2) карьера по данным пятилетних наблюдений и на ст. Джамбул (3).

ление температуры воздуха в летний период противоречит теории изменения температуры воздуха с высотой. Это можно объяснить меньшей величиной альбедо горных пород в Аксае, большей их поглощательной способностью, а отсюда большей величиной радиационного баланса. Так как карьер Аксай имеет сравнительно небольшую глубину, температуры воздуха на дне карьера и на поверхности мало различаются, но все же можно отметить, что в зимний период температуры на поверхности несколько выше, чем на дне, а в летний период — наоборот. Это говорит об устойчивости атмосферы в осенне-зимний период.

Вследствие особенностей температурного режима в Аксае вероятность образования весьма мощных и продолжительных инверсий в карьере ограничивается поздним осенним и зимним периодами года. Весной из-за значительной неустойчивости циркуляционных процессов вероятность инверсий меньше. В летний период инверсии незначительны по мощности и связаны, как правило, с ночным временем суток.

Таким образом, температурный режим характеризуется большими сезонными и годовыми колебаниями температуры, от 40 до  $-14^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая амплитуда температуры воздуха (средняя за 5 лет) составляет  $33,5^{\circ}\text{C}$ .

На существующем этапе разработки температурный режим карьера Аксай незначительно отличается от температурного режима окружающего района. С углублением карьера правомерно ожидать повышения температуры воздуха в карьере в дневное время суток по сравнению с окружающей территорией за счет адиабатического сжатия воздуха с глубиной, влияния горных пород и возрастания радиационного баланса.

### Влажность воздуха

Годовой и суточный ход относительной влажности на поверхности и дне карьера (рис. 5 и табл. 3) выражен весьма четко и в целом обратен ходу температуры. Наибольшая величина от-

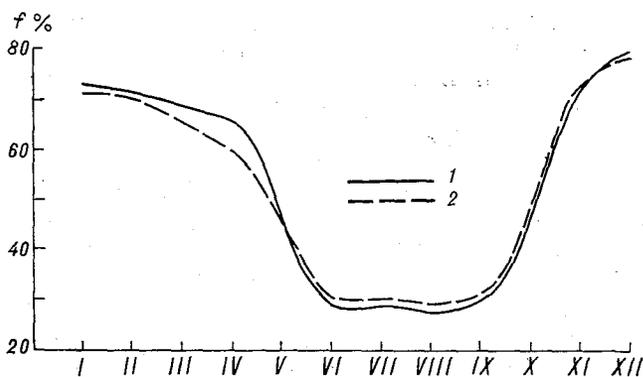


Рис. 5. Годовой ход относительной влажности по данным пятилетних наблюдений на поверхности (1) и дне (2) карьера.

носительной влажности имеет место в зимний период, наименьшая — летом. Максимальное значение ее, по данным 1968—1972 гг., отмечалось в ноябре—декабре. Среднее значение за 5 лет в декабре составляет 79%. С января по апрель относительная влажность воздуха в Аксае практически постоянна на поверхности карьера и весьма незначительно понижается на дне. В течение двух весенних месяцев (апрель—май) она существенно снижается в связи с резким повышением температуры, увеличением притока солнечного тепла и незначительным запасом влаги в почве. С июня по сентябрь относительная влажность воздуха почти постоянна. Летний период характеризуется большим количеством тепла и интенсивными процессами трансформации воз-

душных масс, что приводит к значительному иссушению воздуха. В этот период осадки выпадают весьма редко и они незначительны. Средняя относительная влажность воздуха составляет около 27%.

Суточный ход относительной влажности воздуха можно рассмотреть на примере наиболее характерных четырех месяцев для разных сезонов года (табл. 3), при этом необходимо отметить, что амплитуда изменения влажности воздуха практически одинакова и составляет около 20%, за исключением июля, когда ее величина равна всего 6—7%.

Самая низкая в течение суток влажность отмечалась в июле. В переходные периоды года она не одинакова, весной (в апреле) близка по величине к зимней, но имеет большую амплитуду изменения в течение суток. Максимальная за сутки относительная влажность наблюдалась в утренние часы во все сезоны в течение 5 лет наблюдений. Минимальные значения отмечались днем в 15—16 ч.

Анализ режима влажности позволяет сделать следующие выводы.

1. Для карьера характерны два основных периода: зимний (декабрь — февраль) и летний (июнь — сентябрь) со средними величинами относительной влажности соответственно 80 и 30%.

2. В весенний и осенний периоды отмечаются наиболее интенсивные изменения влажности.

3. Режим влажности и температурный режим обуславливают весьма ограниченные возможности использования влаги как средства борьбы с пылью. Расчеты показывают, что испаряемость с 1 м<sup>2</sup> орошенной поверхности в июле порядка 16 см, поэтому в летний период орошение почвы связано с большим расходом воды.

Полученные материалы длительных экспериментальных наблюдений на метеостанции карьера Аксай могут использоваться для составления оперативного прогноза нарушений естественного воздухообмена и накопления вредных примесей в атмосфере карьера. Длительный ряд наблюдений дает возможность также восстанавливать отсутствующие данные с учетом аномальностей отдельного года.

## Выводы

1. Микроклимат карьера Аксай находится в зависимости от метеорологических условий, характерных для данного района, и обуславливается особенностями самого карьера.

2. Ветровой режим карьера как по скорости, так и по направлению отличается от ветрового режима равнинной станции (Джамбул) и различается с режимом самой местности, т. е. обуславливается в основном своеобразной формой карьера и характеризуется четкими северо-восточным и юго-западным направлениями в те-

чение всего года, а скорости ветра на дне карьера составляют 0,5 скорости ветра на поверхности.

3. Максимальные по величине скорости ветра характерны для юго-западных ветров. Они резко проявляются в периоды прохождения фронтов, создавая опасность снежных заносов.

4. Самое опасное для накопления вредных примесей (по повторяемости штилей и инверсий) время — ранние утренние часы в суточном ходе и зимний период в годовом ходе.

5. Большие контрасты температур в годовом ходе составляют в среднем  $35^{\circ}\text{C}$  и в суточном — до  $10^{\circ}\text{C}$ . Кроме этого, июльские температуры достигают  $40^{\circ}\text{C}$ , что создает тяжелые условия работы в карьерах. Поэтому важно предупредить эти избытки тепла с помощью соответствующей теплозащиты и кондиционирования воздуха в комплексе с обеспыливанием и очисткой воздуха от газообразных примесей.

6. Анализ режима влажности и температурного режима обуславливают ограниченную возможность использования влаги как средства борьбы с пылью.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973. 184 с.
2. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 342 с.

## О ПОВТОРЯЕМОСТИ ИНВЕРСИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В КАРЬЕРЕ АКСАИ

Микроклиматические исследования, выполненные на различных предприятиях по добыче полезных ископаемых открытым способом, показали, что основные случаи вынужденных простоев карьеров связаны с нарушениями естественного воздухообмена, обусловленных инверсионной стратификацией температуры воздуха в карьере и штилевой погодой в окружающей местности [1, 2, 3, 4]. Поэтому выявление основных закономерностей формирования температурных инверсий в пределах карьерного пространства позволит прогнозировать возможные случаи нарушений естественного воздухообмена.

В настоящее время наиболее распространенным является метод оценки термодинамического состояния атмосферы в карьере по результатам измерений на границе системы дно — поверхность карьера [5, 6, 7]. Однако такой метод обладает весьма большим недостатком, так как метеорологические параметры и, в частности, значения температуры по глубине карьера могут изменяться довольно разнообразно, а их значения, измеренные на поверхностной площадке и на уровне земной поверхности в карьере, значительно отличаются друг от друга. По данным Н. Г. Фатуева [8], эти различия для температуры воздуха составляют около 13—15%, причем для малых значений скорости ветра на поверхности карьера ( $u_{\text{п}} < 0,5 \div 1$  м/с),  $t_{\text{в.п}} < t_0$ , где  $t_{\text{в.п}}$  — температура воздуха на поверхностной площадке,  $t_0$  — температура воздуха на уровне земной поверхности в карьере, а для больших  $u_{\text{п}}$   $t_{\text{в.п}} > t_0$ . Таким образом, по результатам измерений на площадках дно — поверхность карьера при малых значениях  $u_{\text{п}}$  повторяемость инверсионных градиентов в карьере будет занижена, а при больших соответственно завышена.

По результатам микроаэрологических исследований, проведенных в Коркинском угольном карьере, П. А. Воронцов и В. И. Селицкая [9] также отмечают недостатки оценки стратификации слоя воздуха в глубоких карьерах по данным наблюдений на

площадках дно — поверхность карьера и подчеркивают, что в теплый период года они фиксировали обычно  $t_{в-п} < t_0$ , поэтому число инверсий по данным дно — поверхность карьера в летнее время будет занижено, а зимой завышено.

Для анализа повторяемости инверсий температуры воздуха в карьере Аксай нами использовались результаты измерений за 1970 г. на площадках дно — поверхность карьера и данные вертикального температурного зондирования с помощью термоградиентографа [10], работающего в полуавтоматическом режиме и производящего измерения с записью на диаграммной ленте температурных разностей на различных высотах относительно опорной высоты ( $H=2$  м) от поверхности почвы на дне карьера. Измерения проводились в срочные часы, 8 раз в сутки. Результаты измерений в окончательно обработанном виде за каждый месяц по срокам сводились в таблицы. Затем для каждого срока за месяц определялось общее число измерений  $n$  и число инверсий  $n_i$ , соответствующее инверсионному распределению температуры в слое воздуха, и вычислялась повторяемость (в процентах) инверсий за каждый срок

$$N_i = \frac{n_i}{n} \cdot 100. \quad (1)$$

Результаты расчетов для наиболее характерных периодов года приведены на рис. 1, из которого видно, что повторяемость инверсий в карьере объективно может оцениваться только по данным непосредственных измерений вертикального профиля температуры, так как и в суточном ходе, и в годовом распределении  $N_{к-п}$  (дно — поверхность) существенно отличается от данных прямого зондирования термоградиентографом  $N_T$ . В целом можно отметить в суточном ходе некоторую тенденцию временного запаздывания  $N_{к-п}$  относительно  $N_T$ , изменяющегося от 6—8 ч для июля до 2—3 ч для остальных сезонов года. В ночные сроки, когда отмечаются малые скорости ветра, значения  $N_T > N_{к-п}$ , а днем  $N_T < N_{к-п}$ , т. е. расчеты по данным на площадках дно — поверхность для карьера Аксай в ночные сроки дают заниженные результаты повторяемости инверсии в карьере, а в дневные часы — завышенные, что подтверждает выводы Н. Г. Фатуева. Для дальнейшего анализа нами использовались данные термоградиентографа.

Рассматривая суточный ход повторяемости инверсии в карьере (рис. 1), можно отметить, что дневные часы характеризуются минимальными значениями  $N_T$  практически во все сезоны года; это время наиболее развитого турбулентного обмена, вследствие чего частота появления инверсий в карьере мала. В ночные сроки вследствие радиационного выхолаживания почвы, снижения скорости ветра и стока охлажденного воздуха в карьер начинает преобладать инверсионное распределение температуры воздуха, максимальные значения которого наиболее часто фиксируются в ранние утренние часы (4—7 ч), в пределах 45—70% случаев. Весьма

высокая повторяемость инверсий (49%) отмечается в 7 ч даже в июле, что, очевидно, связано с радиационным выхолаживанием почвы в карьере в утреннее время, когда поверхность карьера уже освещается солнцем, а дно его вследствие значительной закрытости горизонта еще находится в тени. Поэтому ранние утренние часы являются наиболее вероятным периодом, когда отмечаются нарушения естественного воздухообмена в карьере. В суточном ходе колебания  $N_{и}$  отмечаются в пределах 40—45% практически для всех сезонов года. Такой значительный размах колебаний  $N_{и}$  как в суточном, так и в годовом ходе объясняется нестационарностью метеорологических процессов, формирующих термодинамический режим карьера в целом.

Так как непосредственное зондирование атмосферы в карьерах при ведении основного технологического процесса добычи полезного ископаемого практически невозможно, представляет определенный интерес выявить закономерности изменения  $N_{и}$  в зависимости от основных микроклиматических факторов и их различных комбинаций, например, скорости ветра, температуры воздуха и радиационного баланса почвы, измеренных на поверхностной площадке. При наличии таких данных и выявленных статистических связей представляется возможным прогнозирование температурной стратификации в карьере.

В общем случае сочетание метеорологических параметров следует рассматривать как функцию случайных переменных. Результативный признак при этом, в отличие от функциональной зависимости, имеет вероятност-

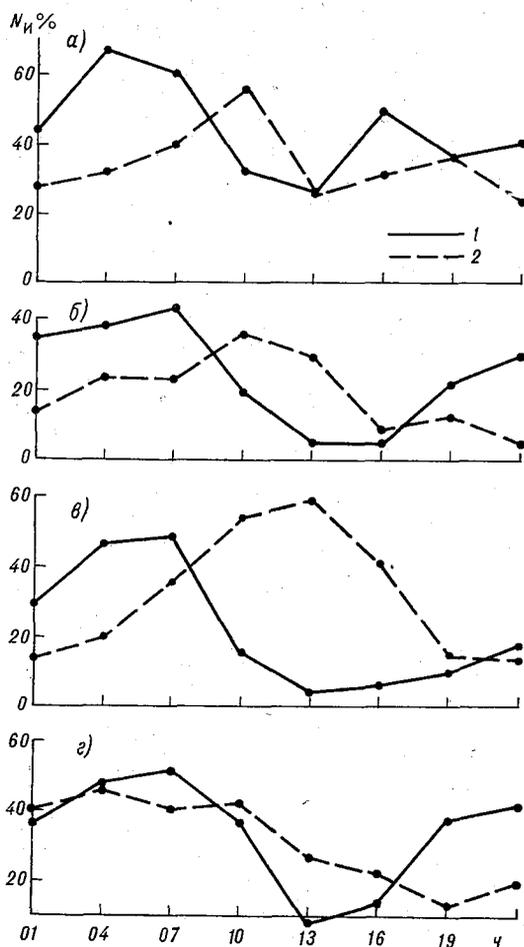


Рис. 1. Суточный ход повторяемости инверсий ( $N_{и}$ ) в карьере по данным термоградиентографа (1) и результатам измерений на площадках дно — поверхность (2).

а — январь, б — апрель, в — июль, г — октябрь.

ный характер: каждому значению независимого переменного соответствует ряд возможных величин зависимого переменного, группируемый с разной вероятностью около средних значений. Поэтому исследование взаимосвязи таких факторов может производиться с помощью статистических зависимостей. Известно [11], что в приземном слое распределение метеоэлементов может быть весьма различным, однако для больших интервалов наблюдений и, в частности, для годовых циклов в первом приближении можно принять, что их распределение близко к нормальному. Это позволяет для анализа взаимосвязи рассматриваемых параметров использовать хорошо разработанные методы корреляционного и регрессионного анализа.

Рассмотрим характер таких связей и их особенности для повторяемости инверсий в карьере (результативный признак) в зависимости от факториальных признаков, измеренных на поверхности карьера (скорость ветра, температура воздуха и радиационный баланс поверхности почвы). Для анализа выбираем четыре наиболее характерных месяца по сезонам года (январь, апрель, июль, октябрь). Результаты средних значений измерений за каждый срок месяца будем рассматривать как выборочную совокупность вариационного ряда. Уравнение связи принимаем в первом приближении линейным:

$$N_n = a + bx, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты,  $x$  — факториальный признак.

В качестве показателя степени прямолинейной связи между факториальным и результативным признаками используем значение коэффициента корреляции, характеризующего тесноту линейной зависимости между случайными величинами и определяемого по формуле [12]

$$r_{Nx} = \frac{\frac{\sum N_n x}{N} - \bar{N}_n \bar{x}}{\sigma_{N_n} \sigma_x}, \quad (3)$$

где  $\bar{N}_n$  и  $\bar{x}$  — средние значения результативного и факториального признаков выборочной совокупности,  $\sigma_{N_n}$  и  $\sigma_x$  — их средние квадратические отклонения,  $N$  — объем выборки вариационного ряда.

Погрешность парного коэффициента корреляции определяем выражением

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \quad (4)$$

Надежность соответствующего коэффициента  $r_i$  вычисляем по формуле

$$\mu = \frac{|r|}{\sigma_r}. \quad (5)$$

При  $\mu \geq 2,46$  для  $N=32$  можно утверждать, что связь между признаками надежная, а коэффициент корреляции с вероятностью  $p \geq 0,98$  является значимым.

По известным значениям  $r_i$ ,  $\sigma_N$  и  $\sigma_x$  вычисляем коэффициенты уравнения регрессии (2)

$$a = \bar{N}_n - b\bar{x}; \quad b = r_{Nx} \frac{\sigma_{N_n}}{\sigma_x}. \quad (6)$$

Для оценки в долях единицы части варьирования результативного признака, линейно связанного с изменением факториального признака, вычисляем значения коэффициента детерминации

$$d = r^2. \quad (7)$$

Стандартная ошибка, допускаемая при вычислении  $N_n$  по уравнению (2)

$$\sigma'_{N_n} = \sigma_{N_n} \sqrt{1 - r^2}. \quad (8)$$

Таблица 1

Основные характеристики парной корреляции  $N_n = a + bx_i$

$x_i$	$\bar{x}_i$	$\sigma_x$	$a$	$b$	$r_{Nx}$	$\sigma_r$	$\mu$	$d$	$\sigma'_N$
$u_{II}$ . . . . .	3,13	0,98	64,7	-10,6	-0,612	0,111	5,5	0,373	13,4
$B_{II}$ . . . . .	0,068	0,212	35,5	-59,2	-0,741	0,080	9,3	0,548	11,3
$t_{в.п}$ . . . . .	10,28	11,25	40,9	-0,918	-0,613	0,110	5,5	0,376	13,3

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 1, из которой видно, что для всех  $x_i$  значения  $\mu \geq 3$ , т. е. предполагаемая линейная связь между признаками является надежной. Наибольшее значение коэффициента корреляции по абсолютной величине имеет место для связи  $N_n$  с радиационным балансом  $B$ , где  $r = -0,741$ , что свидетельствует о возрастании (или убывании)  $N_n$ , когда факториальный признак в среднем убывает (или возрастает).

Отмеченные выше особенности изменения  $N_n$  наглядно подтверждаются также коэффициентами уравнения регрессии  $N_n$  на  $x_i$ , где значения  $b$ , определяющие, насколько в среднем для всего вариационного ряда изменяется  $N_n$  при изменении  $x_i$  на единицу, отрицательны для всех  $x_i$ . По значениям  $d$  для парной корреляции можно утверждать, что около 37% общего изменения  $N_n$  линейно связано с варьированием  $u_{II}$ , 55% — с  $B_{II}$  и примерно 38% — с  $t_{в.п}$ . Отсюда вытекает, что наиболее тесная линейная двухфакторная связь существует между  $N_n$  и  $B$ , характер связи  $N_n$  и  $u_{II}$ , а также  $N_n$  и  $t_{в.п}$  примерно одинаков. Наиболее вероятная ошибка определения  $N_n$  по уравнению (2) для всех рассматриваемых факторов составляет около 11—14%.

В реальных условиях проявляется одновременно все многообразие факториальных признаков, причем некоторые из них имеют также и взаимообусловленную связь между собой. Поэтому оценить их влияние на результативный признак можно методами множественной корреляции. При этом аналогично будем предполагать, что распределение зависимой переменной при различных значениях независимых переменных близко к нормальному, а дисперсия зависимой переменной при разных значениях факториальных признаков примерно одинакова.

Принимая, что результативный признак  $N_{ii}$  можно рассматривать как линейную функцию от каждого фактора  $x_i$ , уравнение множественной регрессии будет иметь вид

$$N_{ii} = A + B_1 x_{i1} + B_2 x_{i2} + \dots + B_n x_{in}, \quad (9)$$

где  $N_{ii}$  — среднее значение результативного признака при заданных величинах факториальных величин.

Степень участия каждого факториального признака в оценке величины функционального значения может быть охарактеризована с помощью стандартизованных коэффициентов регрессии  $\beta_i$ , показывающих, насколько изменяется нормированное отклонение зависимой переменной

$$N'_{ii} = \frac{N_{ii} - \bar{N}_{ii}}{\sigma_{N_{ii}}}, \quad (10)$$

если нормированное отклонение какого-либо факториального признака

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (11)$$

меняется на единицу (при исключенном влиянии всех остальных переменных).

Корреляционное уравнение (9) в стандартизованном масштабе для рассматриваемых условий принимает вид

$$N'_{ii} = \beta_1 u'_{ii} + \beta_2 B'_{ii} + \beta_3 t'_{v.p.} \quad (12)$$

Для вычисления коэффициентов уравнения (9) используются формулы

$$B_i = \beta_i \frac{\sigma_N}{\sigma_{x_i}}; \quad A = \bar{N}_{ii} - B_1 \bar{u}_{ii} - B_2 \bar{B}_{ii} - B_3 \bar{t}_{v.p.}, \quad (13)$$

где для условий карьера Аксай  $\bar{N}_{ii} = 31,5\%$ ,  $\sigma_{N_{ii}} = 16,9\%$ .

Стандартизованные коэффициенты определяются решением системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} r_{Nu} &= \beta_1 \cdot 1 + \beta_2 r_{Bu} + \beta_3 r_{t_{v.p.}u}, \\ r_{NB} &= \beta_1 r_{uB} + \beta_2 \cdot 1 + \beta_3 r_{t_{v.p.}B}, \\ r_{Nt_{v.p.}} &= \beta_1 r_{ut_{v.p.}} + \beta_2 r_{Bt_{v.p.}} + \beta_3 \cdot 1. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Значения коэффициентов взаимной корреляции, вычисленные по формуле (3), приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что наиболее тесная взаимная линейная связь существует между  $B_{\Pi}$  и  $t_{в.п}$  ( $r=0,432$ ) и  $u_{\Pi}$  и  $B_{\Pi}$  ( $r=0,415$ ). Так как при этом значения

Таблица 2

Коэффициенты взаимной корреляции

Фактор	$u_{\Pi} - B_{\Pi}$	$u_{\Pi} - t_{в.п}$	$B_{\Pi} - t_{в.п}$
$r_{ij}$ . . . . .	0,415	0,094	0,432
$\sigma_r$ . . . . .	0,146	0,176	0,144
$\mu$ . . . . .	2,8	0,5	3,0

$\mu > 2,46$ , то установленная связь является надежной. Между  $u_{\Pi}$  и  $t_{в.п}$  корреляционная связь является весьма слабой ( $r=0,094$ ), коэффициент надежности  $\mu=0,5$ , т. е. зависимость является случайной и в расчетах этот показатель не принимается во внимание.

С учетом данных табл. 2 решение системы уравнений (14) дает численные значения стандартизованных коэффициентов:

$$\beta_1 = -0,468; \quad \beta_2 = -0,346; \quad \beta_3 = -0,464. \quad (15)$$

Отсюда уравнение (12) можно записать так:

$$N' = -0,468 u_{\Pi}' - 0,346 B_{\Pi}' - 0,464 t_{в.п}'. \quad (16)$$

Из выражения (16) видно, что наибольшее относительное влияние на изменение повторяемости инверсий в карьере имеет скорость ветра и температура воздуха. Изменение  $u_{\Pi}$  на один стандарт ( $\sigma_{u_{\Pi}}=0,98$  м/с) вызывает изменение  $N_{\Pi}$  на 0,468 его стандарта ( $\sigma_{N_{\Pi}}=16,9\%$ ). Влияние  $t_{в.п}$  на  $N_{\Pi}$  примерно аналогично, изменение  $t_{в.п}$  на единицу ( $\sigma_{t_{в.п}}=11,25^{\circ}\text{C}$ ) ведет к изменению  $N'$  на 0,464.

Коэффициент множественной линейной корреляции, характеризующий степень связи между зависимой переменной и всеми независимыми переменными, определяется уравнением [13]

$$R = \sqrt{r_{Nu} \beta_1 + r_{NB} \beta_2 + r_{Nt} \beta_3}. \quad (17)$$

Подставляя в (17) числовые значения, получим

$$R = \sqrt{0,612 \cdot 0,468 + 0,741 \cdot 0,346 + 0,613 \cdot 0,464} = \sqrt{0,827} = 0,909. \quad (18)$$

Для избежания переоценки тесноты связи в генеральной совокупности необходимо значение  $R$  исправить на величину систематической ошибки, обусловленной отличием основных параметров выборочного ряда от параметров генеральной совокупности

$$R_1 = \sqrt{1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-m-1}} = \sqrt{1 - 0,1728 \cdot \frac{31}{28}} = 0,899, \quad (19)$$

где  $m=3$  — число переменных  $x$  (факториальных признаков).

Средняя квадратическая ошибка исправленного полного коэффициента множественной линейной корреляции приближенно определяется по формуле

$$\sigma_{R_1} \approx \frac{1 - R_1^2}{\sqrt{N - m}} = \frac{1 - 0,8087}{\sqrt{29}} = \frac{0,1913}{5,38} = 0,036. \quad (20)$$

Таким образом,  $R_1 = 0,899 \pm 0,036$ , т. е. множественная линейная связь является надежной.

Для оценки доли участия каждой из независимых переменных  $x_i$  (при исключенном влиянии всех остальных) в создании общего варьирования резульативного признака  $N_{\Pi}$  используется разложение величины  $R^2$ , которое из выражения (18) можно записать

$$R^2 = 0,2834 + 0,2534 + 0,2844 = 0,8272. \quad (21)$$

Таким образом, линейное изменение повторяемости инверсий в карьере Аксай на 83% обусловлено изменениями скорости ветра, радиационного баланса поверхности почвы и температуры воздуха на поверхности карьера. При этом доля участия ветра в создании общего варьирования  $N_{\Pi}$  составляет около 29%, радиационного баланса — примерно 26% и температуры воздуха — около 28%.

Для практического использования установленные зависимости целесообразно выражать в натуральном масштабе (9). Вычислим коэффициенты уравнения множественной регрессии (13):

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -0,468 \cdot \frac{16,9}{0,98} = -8,07; & B_2 &= -0,346 \cdot \frac{16,9}{0,212} = -27,6; \\ B_3 &= -0,464 \cdot \frac{16,9}{11,25} = -0,697; \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$A = 31,5 + 8,07 \cdot 3,13 + 27,6 \cdot 0,068 + 0,697 \cdot 10,28 = 65,8.$$

Стандартная ошибка определения  $N_{\Pi}$  по уравнению (9) составляет

$$\sigma'_{N_{\Pi}} = \sigma_{N_{\Pi}} \sqrt{1 - R_1^2} = 16,9 \sqrt{1 - 0,8087} = 7,4 \%. \quad (23)$$

Средние квадратические ошибки коэффициентов уравнения регрессии определяем по формуле

$$\sigma_{B_i} = \sqrt{\frac{N (\sigma'_{N_{\Pi}})^2 \Delta'_{hh}}{(N - m) \Delta'}}, \quad (24)$$

где  $\Delta'_{hh}$  — минор определителя  $\Delta'$ , равного

$$\Delta' = \begin{vmatrix} N\sigma_1^2 & N\sigma_1\sigma_2r_{21} & N\sigma_1\sigma_3r_{31} \\ N\sigma_1\sigma_2r_{12} & N\sigma_2^2 & N\sigma_2\sigma_3r_{32} \\ N\sigma_1\sigma_3r_{13} & N\sigma_2\sigma_3r_{23} & N\sigma_3^2 \end{vmatrix} \quad (25)$$

С учетом данных табл. 1 и 2 определитель  $\Delta'$  принимает вид

$$\Delta' = N^3 \begin{vmatrix} 0,98^2 & 0,98 \cdot 0,212 \cdot 0,415 & 0,98 \cdot 11,25 \cdot 0 \\ 0,98 \cdot 0,212 \cdot 0,415 & 0,212^2 & 0,212 \cdot 11,25 \cdot 0,432 \\ 0,98 \cdot 11,25 \cdot 0 & 0,212 \cdot 11,25 \cdot 0,432 & 11,25^2 \end{vmatrix} =$$

$$= 32^3 \begin{vmatrix} 0,96 & 0,086 & 0 \\ 0,086 & 0,045 & 1,025 \\ 0 & 1,025 & 126,5 \end{vmatrix} = 32^3 \cdot 3,52. \quad (26)$$

Его соответствующие миноры

$$\Delta'_{11} = N^2 \begin{vmatrix} 0,045 & 1,025 \\ 1,025 & 126,5 \end{vmatrix} = 32^2 \cdot 4,63; \quad (27)$$

$$\Delta'_{22} = N^2 \begin{vmatrix} 0,96 & 0 \\ 0 & 126,5 \end{vmatrix} = 32^2 \cdot 121,5; \quad (28)$$

$$\Delta'_{33} = N^2 \begin{vmatrix} 0,96 & 0,086 \\ 0,086 & 0,045 \end{vmatrix} = 32^2 \cdot 0,0366. \quad (29)$$

По формуле (24) определяем средние квадратические ошибки коэффициентов  $B_i$ :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{B_1} &= \frac{32 \cdot (7,4)^2 \cdot 32^2 \cdot 4,63}{(32-3) \cdot 3,52 \cdot 32^3} = 2,48 = 1,57; \\ \sigma_{B_2} &= \frac{32 \cdot (7,4)^2 \cdot 32^2 \cdot 121,5}{(32-3) \cdot 3,52 \cdot 32^3} = 64,8 = 8,0; \\ \sigma_{B_3} &= \frac{32 \cdot (7,4)^2 \cdot 32^2 \cdot 0,0366}{(32-3) \cdot 3,52 \cdot 32^3} = 0,0196 = 0,140. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Вычисленные коэффициенты множественной линейной регрессии (22) с учетом (30)

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -8,07 \pm 1,57; \\ B_2 &= -27,6 \pm 8,0; \\ B_3 &= -0,697 \pm 0,140 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

показывают, что полученные значения  $\sigma_{B_i}$  существенно меньше самих коэффициентов регрессии, это свидетельствует о достаточной их устойчивости.

Окончательно изменение среднего значения повторяемости инверсий в карьере в зависимости от скорости ветра, радиационного баланса и температуры воздуха на поверхности карьера может быть представлено уравнением

$$N_{и} = 65,8 - 8,07 \cdot u_{п} - 27,6 \cdot B_{п} - 0,697 \cdot t_{в. п} \pm 7,4\%. \quad (32)$$

Составление фактических значений  $N_p$  в карьере и вычислен-ных по уравнению (32) показывает их хорошую сходимость (рис. 2), что подтверждает надежность расчета в целом. Полученное уравнение (32) может использоваться для прогно-ирования повторяемости инверсий в карьере в зависимости от основных метеорологических параметров, измеренных на поверх-ностной площадке карьера.

Таким образом, сравнительный анализ годового цикла повто-ряемости инверсий в карьере Аксай показал следующее.

1. Результаты темпе-ратурных измерений на дне и поверхности карье-ра для характеристики температурных инверсий выявляются приближенные значения  $N_p$  в дневные часы и заниженные в ноч-ные сроки. Объективная оценка стратификации ат-мосферы в карьере может быть получена только при прямом зондирова-нии карьерного простра-ства.

2. Наибольшая повто-ряемость инверсионной стратификации воздуха в карьере в годовом цик-ле имеет место в зимний период, минимальные значения отмечаются ле-том. В среднем ходе пов-торяемость инверсии мак-симальна в ранние утрен-ние часы и достигает 45—65% практически во все сезоны года.

3. Для оценки повторяемости инверсий и прогнозирования их в первом приближении можно использовать полученные уравне-ния статистических связей результивного признака в зависи-мости от основных метеорологических параметров.

4. Для уточнения и совершенствования методики прогноиро-вания повторяемости инверсий в карьере необходимо учитывать изменение глубины карьера и влияние других метеорологических параметров.

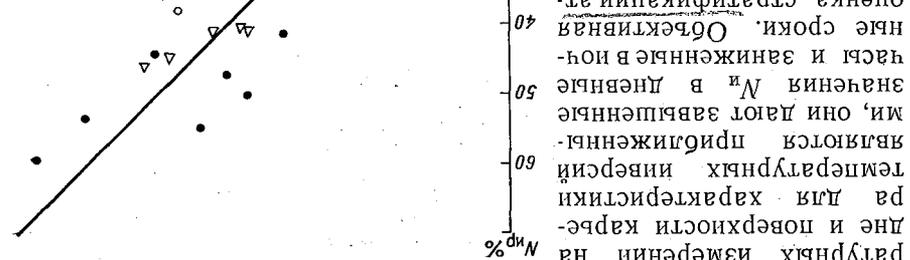


Рис. 2. Сравнение фактических ( $N_p$ ) и рас-четных ( $N_p$ ) значений повторяемости ин-версий в карьере Аксай. 1 — январь, 2 — апрель, 3 — июль, 4 — октябрь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973, 184 с.
2. Ишукова Т. Л. Условия формирования и развития смоговых явлений в Коркинском угольном карьере. — «Сб. работ Свердловской ГМО», 1970, вып. 10, с. 129—134.
3. Лидин Г. Д. Вопросы, привносящие к загазованию Коркинского угольного карьера. — В кн.: Проблемы борьбы с рудничными газами и пылью. М., «Наука», 1969, с. 68—79.
4. Силин Ф. М. Метеорологические условия образования инверсий, повышения загазованности и запыленности в карьерах Урала. — «Тр. ГТО», 1970, вып. 270, с. 153—170.
5. Силин Ф. М. Микроклимат карьеров Урала. — «Сб. работ Свердловской ГМО», 1970, вып. 10, с. 9—23.
6. Усынин В. И. Микроклимат карьеров Кольского полуострова и его особенности. — В кн.: Проветривание карьеров и рудников с большими зонами обрушения. Л., «Наука», 1966, с. 83—93.
7. Витколов Н. З., Иванова И. И. О тепловом режиме глубоких карьеров. — «Тр. ГТО», 1973, вып. 310, с. 75—85.
8. Фатеев Н. Г. Общая загазованность и ответственное проветривание карьеров. — В кн.: Вопросы борьбы с пылью в карьерах. М., изд. ЦНИИЦветмет, 1963, с. 57—61.
9. Воронцов П. А., Селинская В. И. Некоторые особенности формирования инверсий тепмепратуры в карьерах. — «Тр. ГТО», 1972, вып. 294, с. 20—28.
10. Иванов И. И., Хирьян В. А. Приборы вертикального зондирования атмосферы карьеров. — «Тр. ГТО», 1972, вып. 294, с. 97—109.
11. Пановский Г. А., Бравер Г. В. Статистические методы в метеорологии. Л., Гидрометеонадат, 1972, 210 с.
12. Рыжов П. А. Математическая статистика в горном деле. М., «Высшая школа», 1973, 287 с.
13. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. М., изд. МГУ, 1972, 292 с.

*П. В. БЕРЕСНЕВИЧ, Л. А. РАМЕНСКИЙ, А. В. ТКАЧЕНКО,  
А. И. ФУРМАН, О. И. ШАНДЕР, В. М. ШОШИН*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТА КАРЬЕРА НОВОКРИВОРОЖСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА**

Систематическое изучение микроклиматических особенностей карьеров Криворожского железорудного бассейна с целью организации метеорологического обеспечения горнорудных работ начато в 1972 г. Украинским научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом по инициативе и при участии Всесоюзного научно-исследовательского института безопасности труда в горнорудной промышленности.

Исследования проводились в карьере № 1 Новокриворожского горно-обогатительного комбината — одного из старейших в Криворожском бассейне (разрабатывается с 1956 г.). Карьер условно разделен на две части (восточную и западную) неразрабатываемым массивом скальных горных пород. Его параметры: длина 1680 м; ширина 800 м (восточная часть) и 1140 м (западная часть); глубина соответственно 168 и 211 м.

В связи со значительной глубиной карьера, сложной геометрической формой и недостаточным разнесом бортов усложняется проблема выноса вредных примесей, выделяющихся при различных технологических операциях. В особенности это связано с выбросами примесей при взрывах, бурении, разгрузке горной массы и т. д. Поэтому уже в настоящее время назрела необходимость применения, помимо локальных средств пылегазоподавления, искусственного проветривания участков карьеров. Применение этих средств, однако, может быть недостаточно эффективным без знания микроклиматических особенностей карьера. Они позволяют определить район карьера, где необходима интенсификация воздухообмена и прогнозировать длительность применения средств искусственного проветривания.

В исследуемом карьере оборудованы два стационарных наблюдательных пункта, на которых ведутся стандартные наблюдения за основными метеорологическими элементами и атмосфер-

ными явлениями. Пункт № 1 расположен на поверхности, у бровки карьера (отметка +85 м), пункт № 2 — на дне карьера (отметка — 115 м). Наблюдения велись в синоптические сроки (через каждые 3 ч) синхронно сериями максимальной продолжительностью 36 ч, с перерывами между сериями 30 ч.

Кроме стандартных наблюдений, проводились экспедиционные исследования, включающие в себя аэрологические, актинометрические и пылегазовые наблюдения, а также термоанемометрические съемки.

В настоящей статье излагаются результаты анализа данных наблюдений за температурой, влажностью и ветром за двухлетний период (1972—1973 гг.).

### Режим температуры и влажности

По данным стандартных метеорологических наблюдений, температура воздуха на дне и поверхности карьера имеет четкий суточный ход с максимумом в 15 ч и минимумом в 6 ч. В отдельные месяцы отмечаются небольшие отклонения от данного хода.

Связь между температурой воздуха на поверхности и дне карьера достаточно тесная (коэффициент корреляции около 0,90) и практически линейная. Это обусловлено тем, что термический режим на поверхности и дне карьера формируется главным образом под влиянием макропроцессов.

Анализ полученных данных о температуре воздуха на дне и поверхности карьера показал, что в среднем преобладают положительные условные градиенты температур ( $\gamma_{\text{усл}}^{\circ\text{C}/100 \text{ м}}$ ), которые в отдельные сроки близки к величине сухадиабатического градиента.

Однако средние характеристики условных градиентов не дают отчетливого представления об их структуре. В табл. 1 приведено распределение значений  $\gamma_{\text{усл}}$  по градациям, принятым в [1].

Если условия вертикальной устойчивости в карьерном пространстве оценивать только по  $\gamma_{\text{усл}}$ , то в соответствии с данными табл. 1 следует считать, что наилучшие условия для проветривания карьера отмечались в теплый период 1972 г. Повторяемость инверсионных и изотермических градиентов не превышала в сумме 20%, в то время как на долю сверхадиабатических градиентов приходилось 30—40%. В холодный период года инверсионные и изотермические градиенты составляют уже значительную величину — днем 27%, ночью 48%.

Представление о продолжительности инверсионного распределения температуры в карьере можно получить, сравнивая число часов с инверсией ( $\tau_{\text{и}}$ ) с общим числом часов наблюдений ( $\tau_0$ ):

$\delta_{\text{и}} = \frac{\tau_{\text{и}}}{\tau_0}$ . В теплый период 1972 г.  $\delta_{\text{и}}$  составляло всего 10%, в холодный период 1972—1973 гг. эта величина возросла до 16% днем и до 39% ночью.

Отмеченные выше закономерности являются ориентировочными, так как определение температурной стратификации в карьере по данным двух пунктов не всегда отражает действительную картину [4, 5]. Так, например, в ночь с 21 на 22 июля 1973 г. в усло-

Таблица 1

Повторяемость (%) значений условного градиента температуры  $\gamma_{\text{усл}}$  в заданных градациях

Сроки	Градация					Число случаев
	< -1,0	-1,0, -0,3	-0,2, 0,2	0,3-1,0	>1,0	
Май — сентябрь 1972 г.						
21—08	3	4	6	44	43	275
09—20	3	4	11	53	29	540
Декабрь 1972 г. — апрель 1973 г.						
21—08	13	12	23	13	34	225
09—20	4	8	15	38	35	454
Май — сентябрь 1973 г.						
21—08	25	24	13	21	16	205
09—20	10	9	15	32	34	546

виях безоблачной погоды было проведено шесть подъемов радиозонда (совместно с работниками ЛГМИ) с целью подробного изучения хода метеорологических элементов в карьере. По данным метеопунктов, на дне и поверхности карьера в течение всего периода наблюдений отмечалась разность в пределах  $2^{\circ}\text{C}$ , с услов-

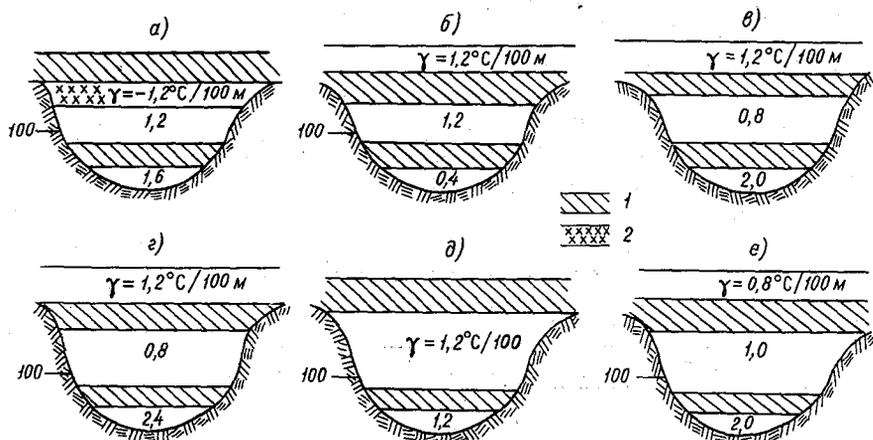


Рис. 1. Распределение градиентов температуры воздуха в карьере 21—22 июля 1973 г.

а — 22 ч, б — 23 ч, в — 01 ч, г — 03 ч, д — 05 ч, е — 07 ч; 1 — слой изотермии, 2 — слой инверсии.

ным градиентом около  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ . В действительности же в карьере в течение всей ночи сохранялась четырехслойная система (рис. 1) со сверхадиабатическими градиентами в придонном и среднем слоях и двумя изотермическими слоями.

Сравнение температурной стратификации внутри карьера с изменением температуры воздуха в окружающем его районе показывает, что задерживающие слои в объеме карьера возникают, когда изотермическое или инверсионное распределение температуры в окружающем карьер пространстве начинается с вечера и удерживается в течение всей ночи.

Наличие достаточного числа параллельных наблюдений в карьере и на аэрологической станции дает возможность установить количественную связь между временем возникновения, мощностью и интенсивностью инверсии в окружающем районе и появлением задерживающих слоев внутри карьера.

Суточный ход относительной влажности в карьере следует суточному ходу температуры воздуха. Минимум относительной влажности отмечается в 15—16 ч (37—47% в теплый период и 65—67% в холодный), максимум — в 6 ч (65—68% в теплый период, 84—87% в холодный).

Корреляционная связь между значениями относительной влажности воздуха на поверхности и дне карьера значительно слабее ( $r=0,6-0,8$ ), чем между температурами. Одной из причин этого ослабления является искусственное изменение относительной влажности воздуха внутри карьера из-за систематического полива водой горной массы, автодорог и т. д., применяемого для борьбы с пылевыведением.

### Ветровой режим карьера

Сравнение суточного хода скорости ветра на поверхности ( $u_{\text{п}}$ ) и дне карьера ( $u_{\text{д}}$ ) представлено в табл. 2 отношением  $u_{\text{п}}/u_{\text{д}}$ . Как видно, в период наблюдений с низкими температурами  $u_{\text{п}}/u_{\text{д}} \geq 2$ , тогда как в теплое время года отношение  $u_{\text{п}}/u_{\text{д}} > 2$  в ночные и утренние часы и меньше 2 в дневное время. Такие раз-

Таблица 2

Суточный ход отношения  $u_{\text{п}}/u_{\text{д}}$

Срок наблюдения, ч								Число наблюдений
00	03	06	09	12	15	18	21	
Декабрь 1972 г. — апрель 1973 г.								
2,0	2,5	2,0	2,6	2,0	2,5	2,1	2,8	793
Май — сентябрь 1973 г.								
2,4	2,4	1,7	2,3	1,5	2,0	1,8	1,5	664

личия объясняются падением ветровой активности за счет охлаждения бортов в ночное время и ее увеличением за счет солнечной радиации.

В отдельные сроки скорость ветра на дне была больше скорости на поверхности. Это объясняется возникновением местных циркуляций воздуха в объеме карьера под влиянием неоднородностей рельефа и неравномерностью нагрева различных участков внутрикарьерного пространства.

Наиболее неблагоприятные условия для проветривания создаются при штилях. Повторяемость штилей (скорость ветра  $\leq 0,5$  м/с) на поверхности невелика, зато на дне карьера они составляют почти половину всех случаев измерений.

На поверхности карьера во все сезоны года преобладают ветры северо-восточного направления, на дне — ветры южных румбов (рис. 2).

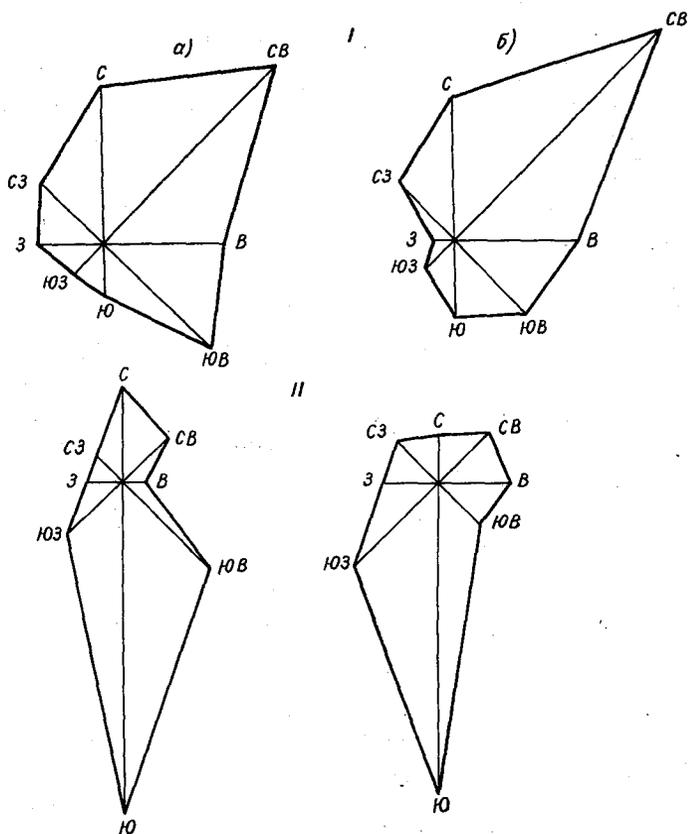


Рис. 2. Розы ветров для поверхности (I) и дна (II) карьера.

а — ночь, б — день.

Более полное представление о ветровом режиме в карьере дают наблюдения за свободными и уравновешенными шарами-пилотами (рис. 3). На рисунке отчетливо заметно изменение, которое претерпевают все профили на середине карьера. Осенью скорость ветра вверх от этого уровня начинает быстро расти (от 1 до 3—4 м/с), а летом выше середины карьера она практически остается постоянной (около 4 м/с). Это можно объяснить различной высотой задерживающих слоев в карьере в летние и осенние месяцы.

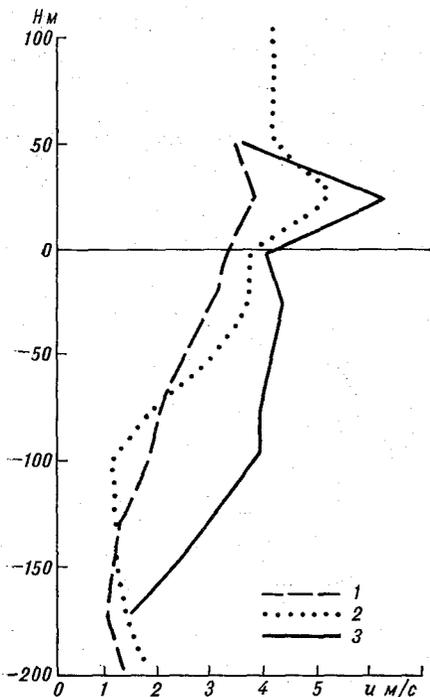


Рис. 3. Профили скорости ветра в карьере по данным экспедиционных наблюдений.

1 — весна, 2 — осень, 3 — лето.

высотой задерживающих слоев в карьере в летние и осенние месяцы. На высоте 25 м над поверхностью карьера наблюдается резкое увеличение скорости ветра — мезоструя.

По данным шаропилотных наблюдений определены величины результирующего ветра на различных уровнях карьера. В тех случаях, когда направление ветра от дна карьера до поверхности изменяется меньше чем на  $90^\circ$ , схему можно считать прямоточной [2]. Подобная схема обнаруживается в рассматриваемом нами карьере при юго-восточных и северо-западных направлениях ветра (табл. 3). При других направлениях ветра вне карьера (северном, южном и западном) внутри его отмечается движение воздуха по рециркуляционной схеме (табл. 3).

Зависимость характера циркуляции в карьере от направления ветра легко объясняется особенностями структуры карьера.

Наблюдения за уравновешенными шарами-пилотами позволили вычислить некоторые характеристики вертикальных движений в карьере. Анализ вертикальных токов проводился по схеме, предложенной в работе [3]. В качестве примера приведем распределение вертикальных токов  $w$  см/с в дневные и ночные часы (табл. 4). В этой таблице  $\bar{w}_1$  — среднее из абсолютных значений  $w$ ,  $\bar{w}_2$  — среднеалгебраическое значение  $w$ ,  $\bar{u}$  — средняя горизонтальная скорость перемещения шара-пилота в слое,  $\beta = \frac{\bar{w}_1}{\bar{w}_2}$ ,  $\alpha = \arctg \frac{\bar{w}_2}{\bar{u}}$ .

Таблица 3

Направление (числитель, градусы) и скорость (знаменатель, м/с)  
результатирующего вектора на различных уровнях в карьере

Направление ветра на поверхности	Высота над поверхностью земли, м										
	-200	-175	-150	-125	-100	-75	-50	-25	0	25	50
Прямоточная схема проветривания											
ЮВ	—	$\frac{103}{1,1}$	$\frac{108}{0,9}$	$\frac{142}{1,1}$	$\frac{143}{1,3}$	$\frac{115}{1,9}$	$\frac{110}{4,4}$	$\frac{119}{5,2}$	$\frac{126}{5,0}$	$\frac{120}{6,8}$	$\frac{109}{6,0}$
СЗ	—	$\frac{001}{1,2}$	$\frac{340}{2,0}$	$\frac{331}{2,7}$	$\frac{324}{4,0}$	$\frac{323}{3,9}$	$\frac{316}{4,2}$	$\frac{319}{4,6}$	$\frac{323}{4,0}$	$\frac{319}{6,1}$	$\frac{326}{3,5}$
Рециркуляционная схема проветривания											
С	$\frac{135}{0,4}$	$\frac{162}{0,8}$	$\frac{260}{0,3}$	$\frac{321}{0,9}$	$\frac{290}{0,7}$	$\frac{330}{0,4}$	$\frac{58}{0,6}$	$\frac{16}{1,0}$	$\frac{11}{1,2}$	$\frac{25}{1,8}$	$\frac{22}{1,7}$
Ю	$\frac{135}{1,0}$	$\frac{132}{2,4}$	$\frac{103}{0,8}$	$\frac{0}{0,0}$	$\frac{234}{0,5}$	$\frac{204}{0,7}$	$\frac{176}{1,0}$	$\frac{158}{1,8}$	$\frac{191}{2,3}$	$\frac{196}{2,2}$	$\frac{198}{3,2}$
З	$\frac{45}{0,7}$	$\frac{228}{0,8}$	$\frac{287}{1,3}$	$\frac{231}{1,6}$	$\frac{170}{1,4}$	$\frac{225}{3,5}$	$\frac{260}{3,8}$	$\frac{273}{3,8}$	$\frac{265}{3,6}$	$\frac{265}{3,5}$	$\frac{271}{4,8}$

Согласно данным табл. 4, днем шар-пилот, выпускаемый со дна карьера, отмечает во всех слоях наличие только восходящих движений, скорость которых растет от дна карьера до высоты 100—150 м над дном. Ночью вертикальные токи ослабевают; в средней части карьера преобладают нисходящие движения.

В среднем за сутки отношение  $\bar{w}_2/\bar{u}$  с высотой меняется мало, его значение близко к 0,5. При этом величина  $\alpha$ , представляющая собой угол наклона воздушного потока к горизонту, близка к 25°, что больше углов откоса карьера (22°).

Между тем при рассмотрении этих же величин отдельно за дневное и ночное время обнаруживается их суточный ход и зависимость от высоты. Наибольшие различия отмечаются в слое 100—150 м над дном карьера, где днем отношение  $\bar{w}_2/\bar{u}=1$ ,  $\alpha=45^\circ$ , а ночью вертикальные токи слабы, преобладают нисходящие движения, угол  $\alpha$  близок к нулю.

Таким образом, можно отметить следующие особенности микроклиматического режима в карьере.

1. В течение суток в карьере преобладает неустойчивая стратификация температуры воздуха, нередко отмечаются сверхадиабатические градиенты. Однако при наличии положительных градиентов в карьере могут наблюдаться задерживающие слои с  $\gamma \leq 0$ . Задерживающие слои всегда сопровождаются инверсионным распределением температуры в окружающем карьер районе.

2. Направление воздушных потоков на нижних отметках карьера существенно отличается от направления на его поверхности.

Характеристика вертикальных движений в карьере  
в дневные и ночные часы. Июль 1973 г.

	Слой, м				
	-200, -150	-150, -100	-100, -50	-50, -0	0-50
	День				
$\bar{w}_1$ . . . . .	107	147	253	128	200
$\bar{w}_2$ . . . . .	107	147	249	128	196
$\beta$ . . . . .	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\bar{u}$ . . . . .	260	270	250	350	520
$\bar{w}_2/\bar{u}$ . . . . .	0,42	0,56	1,0	0,37	0,38
$\alpha$ . . . . .	23	29	45	20	21
	Ночь				
$\bar{w}_1$ . . . . .	68	84	66	0	216
$\bar{w}_2$ . . . . .	68	80	-11	0	216
$\beta$ . . . . .	1,0	1,1	-6,0	—	1,0
$\bar{u}$ . . . . .	130	200	210	200	320
$\bar{w}_2/\bar{u}$ . . . . .	0,50	0,40	-0,05	0	0,68
$\alpha$ . . . . .	27	22	0	0	34
	Средние				
$\bar{u}$ . . . . .	190	230	220	280	420
$\bar{w}_2/\bar{u}$ . . . . .	0,47	0,48	0,50	0,43	0,50
$\alpha$ . . . . .	25	26	27	23	27

3. В теплое время года преобладает рециркуляционный тип циркуляции воздуха в карьере.

4. На направление воздушных потоков в карьере значительную роль оказывает его конфигурация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов М. С., Щербак В. Н. Температурный режим и его роль при естественном проветривании глубокого угольного карьера. — «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 147—155.
2. Воронцов П. А., Селицкая В. И., Честная И. И. Экспериментальная проверка теории плоскопараллельной струи в Коркинском карьере. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 10—22.

3. Воронцов П. А. и др. О турбулентности и вертикальных токах воздуха в Коркинском угольном карьере в дневные часы. — В кн.: Воздухообмен и микроклимат в карьерах. Челябинск, изд. НИИОГР, 1969, с. 54—66.
4. Воронцов П. А., Селицкая В. И. Петрова Е. В. Вертикальное распределение температуры и влажности воздуха в Коркинском карьере. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 38—52.
5. Белов Н. Ф., Безлюдова Л. В. Некоторые особенности метеорологического режима Коркинского карьера. — «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 53—71.

В. П. КУЛИКОВ, Е. П. ХАРИШИН, В. Н. ЩЕРБАК,  
А. Н. КУПИН

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ УГОЛЬНОГО КАРЬЕРА им. 50-летия ОКТЯБРЯ НА СТАДИИ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В связи с намеченным дальнейшим развитием открытой угледобычи в Кузнецком бассейне и значительным увеличением глубины карьеров (в ряде случаев до 500—550 м) важно рассмотреть в перспективе условия воздухообмена в них.

Карьер им. 50-летия Октября комбината «Кемеровоуголь» будет карьером нового типа, имеющим значительную концентрацию горного и транспортного оборудования, высокую производительность труда горнорабочих.

При реконструкции первой очереди карьера первоначально будет обрабатываться Центральный блок, имеющий наибольшую угленасыщенность и расположенный между 6-й и 13-й разведочными линиями. В результате реконструкции карьер достигнет производительности 10,5 млн. т/год, из них 22% составят коксующиеся угли.

Исследования влияния различных факторов на воздухообмен показали, что наиболее интенсивное накопление вредных примесей в приземном слое [2, 6] и в карьерном пространстве наблюдается при устойчивом (инверсионном) состоянии атмосферы и наличии смога. Формирование инверсий и образование смога зависят от многих параметров, основными из которых являются температура воздуха, его влажность и скорость ветра. Изменение этих параметров во времени и пространстве обуславливает их сложную взаимосвязь, является следствием общей циркуляции атмосферы и воздействия горнотехнических факторов на воздухообмен. Исследованиями роли синоптических процессов в формировании инверсий и образовании смогов в Коркинском карьере установлено [1, 9], что туманы образуются в основном в зимний период в ультраполярных антициклонах и гребне азиатского антициклона при отрицательном радиационном балансе.

Основными чертами зимней циркуляции над юго-восточной

частью Западной Сибири являются антициклонические процессы, особенно проявление мощного азиатского антициклона, занимающего большую часть Западной Сибири. Формирование антициклона связано с зимним охлаждением континента, поэтому он является устойчивым барическим образованием и стационарирует над территорией Западной Сибири в течение всей зимы. Воздух в нем, особенно в нижних слоях, сильно охлаждается за счет отрицательного радиационного баланса, поэтому в зимний период в пограничном слое атмосферы часто наблюдаются температурные инверсии.

И. А. Шевчук приводит данные по интенсивности, мощности и повторяемости температурных инверсий. В течение зимнего сезона (ноябрь 1967 г.—март 1968 г.) инверсии или изотермии в нижнем 1000-метровом слое отмечены в 121 случае из 123. При-

Таблица 1

Повторяемость (%) высоты нижней границы слоя инверсии или изотермии над уровнем моря. Новосибирск

Высота нижней границы, км	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0—0,49	44	43	41	46	43	43	51	47	55	37	35	39
0,50—0,99	17	18	16	12	7	11	8	11	5	10	17	18
1,00—1,99	24	22	25	20	23	14	11	15	15	29	26	23
2,00—2,99	10	9	12	13	13	15	15	13	12	14	12	13
3 и более	5	8	6	9	14	17	15	14	13	10	10	7

чем приземные инверсии составляют около 50%, в слое 0,1—0,5 км—30% случаев с инверсиями. Максимальная вертикальная мощность задерживающего слоя около 2,3 км. Почти в 40% случаев мощность инверсии превышала 1000 м и только 7 раз толщина слоя была меньше 100 м. Средний температурный градиент в 84 случаях меньше—0,5°C/100 м, в 36 случаях меньше—1,0°C/100 м. Минимальный градиент равен—3,3°C/100 м.

В весенний, летний и осенний периоды также возникают слои воздуха с инверсионным распределением температуры (табл. 1). При этом летом они преимущественно радиационного происхождения. Днем вследствие интенсивного прогрева воздуха восстанавливается нормальное распределение температуры с высотой. Зимой инверсии существуют длительное время, до 20—30 дней, разрушаются они только в результате активизации циклонической деятельности на юге Западной Сибири.

По нашим данным, в течение трех холодных периодов (1969—1971 гг.) преобладала антициклоническая погода, причем в феврале, марте и декабре 1969 г.—по 20—24 дня в месяц. В это же время инверсии существовали в течение 22—30 дней. Циклоны с Северного Ледовитого океана, Каспийского и Аральского морей редко достигали районов Кузбасса, чаще отмечалось лишь про-

хождение ложбин. Под воздействием этих вторжений азиатский антициклон отступал на юг, образуя обширный пояс высокого давления с гребнем, ориентированным на северо-восток страны.

В настоящее время температурный фактор оказывает неблагоприятное влияние на процесс воздухообмена в карьере. С 4 по 13 февраля 1973 г. нами были проведены метеорологические наблюдения на поверхности и дне наиболее глубокой части карьера. Температурные инверсии в карьере наблюдаются уже сейчас, хотя его глубина не превышает 100 м. Разность температур дно — поверхность достигает значительных величин (до  $-4,7^{\circ}\text{C}$ ), причем при антициклонической погоде максимальная разность температур отмечается сразу после восхода солнца. Наблюдался случай мощной температурной инверсии в теплом секторе циклона, когда при прохождении теплого фронта температура воздуха на поверхности повысилась на  $5,2^{\circ}\text{C}$  за 1 ч, а перепад температур достиг  $-6,0^{\circ}\text{C}$ . Однако эта инверсия существовала непродолжительное время (около 1 ч), так как благодаря интенсивному перемешиванию воздуха за счет энергии ветра произошло выравнивание температур.

При антициклонических инверсиях в утренние часы отмечался дым в карьере, который по мере прогрева воздуха постепенно поднимался над карьером в виде темного облака. К сожалению, в это время не представилось возможным замерить концентрацию вредных газов.

При оценке влияния метеорологических факторов на воздухообмен наиболее важным является учет не одного какого-то параметра, а комплексного — термодинамического. В этой связи интерес представляют данные И. А. Шевчука по г. Новосибирску. Из 123 случаев зондирования штиль на уровне флюгера наблюдался в 56 случаях, причем в 54 отмечено наличие приземной или приподнятой инверсии. В зимний период в 25% случаев штиль у поверхности земли сопровождался слабыми скоростями ветра в слое до 1,5 км. Наиболее часто (в 55% случаев) уже на высоте 200 м скорость ветра возрастала до 4—6 м/с и более, достигая на высоте 1,5 км 12—15 м/с. Это подтверждается результатами нашего анализа случаев инверсий по Новосибирску за 1969—1971 гг.

Ряд исследователей рассматривает сочетание инверсий со штилем как характеристику застойного процесса в атмосфере над данным районом. В этой связи представляет интерес рассмотрение годового хода скорости ветра и повторяемости штилей. По данным ближайшей к карьере метеостанции (в г. Гурьевске), средняя скорость ветра за холодный период (ноябрь — март) равна 3,6 м/с, повторяемость штилей — 20%, а средняя скорость по данным метеостанции Бугры (Новосибирск) составляет 3,9 м/с, т. е. в районе карьера скорости ветра несколько ниже, чем в Новосибирске. Следовательно, нужно ожидать, что в районе карьера термодинамические условия будут способствовать возникновению инверсий и возможно резкое ухудшение воздухообмена в карьерном пространстве.

Неблагоприятной особенностью ветрового режима территории, прилегающей к карьеру, является большая повторяемость слабых ветров: скоростью до 5 м/с—70% годового баланса времени, менее 3 м/с—50%.

Интенсивность естественного воздухообмена и санитарно-гигиенические условия труда в карьере резко ухудшаются при туманах. По данным метеостанции Гурьевск, повторяемость туманов особенно высока в зимний период, в декабре—феврале отмечается 7—8 случаев в месяц. Туманы, как правило, образуются и существуют при инверсиях (рис. 1). Причем за день с инверсией принимаем случай продолжительностью более 12 ч. Таким образом, в холодный период года, преимущественно с ноября по февраль, в карьере им. 50-летия Октября следует ожидать ухудшения воздухообмена по метеорологическим условиям. Это вызывается высокой повторяемостью и продолжительностью температурных инверсий, их большой интенсивностью и вертикальной мощностью, неблагоприятным ветровым режимом прилегающей к карьеру территории, частым возникновением туманов. Наиболее часто неблагоприятные условия будут наблюдаться в ночные и утренние часы.

Приводимая ниже оценка эффективности естественного проветривания первой очереди отработки угольного карьера им. 50-летия Октября выполнена нами двумя способами: по формулам В. С. Никитина [3, 4] для атмосферы, когда термический фактор не оказывает влияния на естественный воздухообмен (рис. 2), а также по формуле (2) с учетом влияния температурной инверсии, ухудшающей рассеивание вредных примесей (табл. 3 и 4).

Расчеты по первому варианту произведены при величине угла расширения ветрового потока в карьере  $\alpha_2$ , которая обычно принимается равной примерно  $15^\circ$  [3, 5, 7 и др.]. Однако специальными исследованиями на Коркинском угольном карьере установлено [8], что в зимний период, являющийся наиболее неблагоприятным по условиям проветривания, угол  $\alpha_2$  часто бывает значительно меньше  $15^\circ$ , составляет в среднем  $8,4^\circ$ , изменяется от  $2^\circ$  до  $16^\circ$ , в 33% общего числа случаев он равен  $6-8^\circ$ . Указанное вызвано малой турбулентностью атмосферы и слабым образованием вихрей, выносящих вредные примеси.

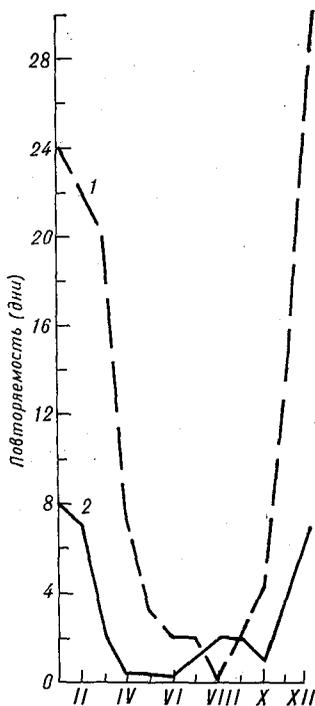


Рис. 1. Повторяемость (дни) температурных инверсий (1) (Новосибирск) и туманов (2) (Гурьевск).

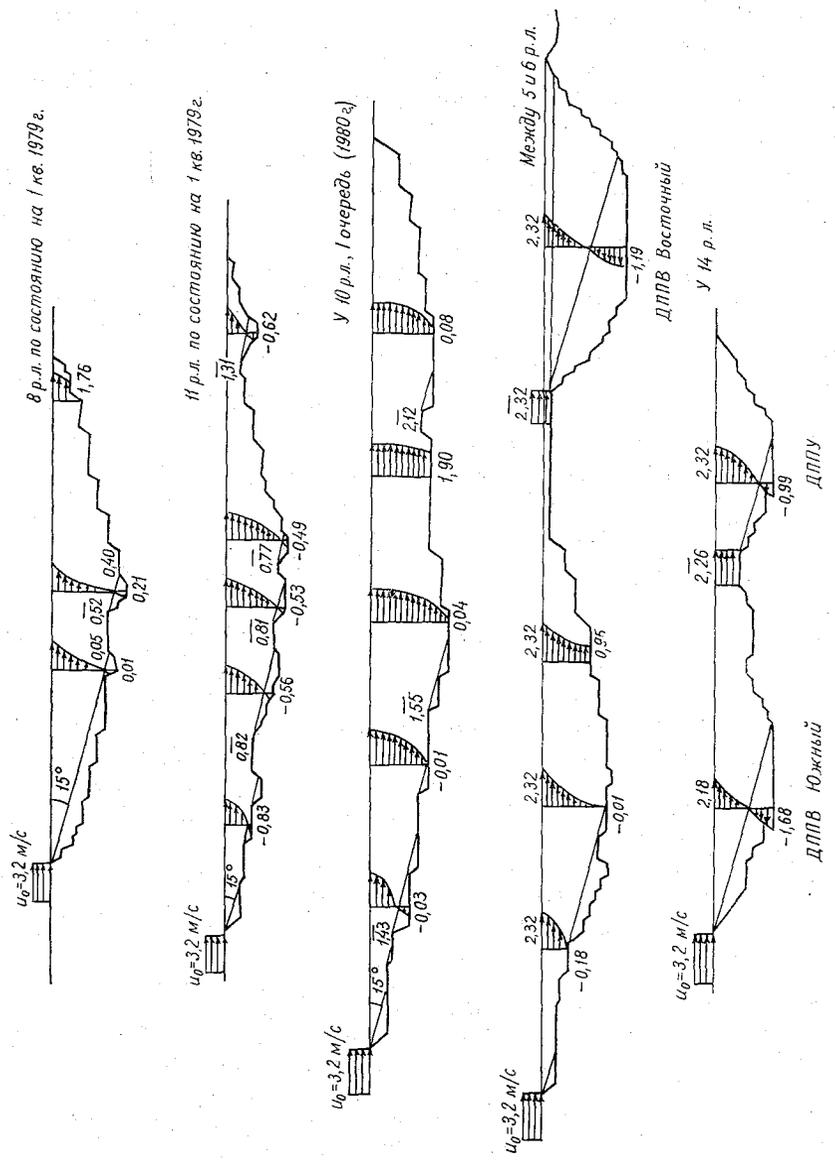


Рис. 2. Схемы естественного проветривания первой очереди угольного карьера им. 50-летия Октября.

Таблица 2

## Суммарная интенсивность образования пыли (тыс. мг/с)

Участок	Источник	Количество единиц	Без пылеподавления		С пылеподавлением		Суммарная мощность оборудования, участвующего в газовой выделении, л. с.
			пыль всех фракций	пыль фракций 10 мкм и менее	пыль всех фракций	пыль фракций 10 мкм и менее	
Центральный блок	Автосамосвалы БелАЗ-549	55	945,0	268,0	94,50	26,80	45840
	Углевозы	11	148,5	42,0	14,85	4,20	
	Бульдозеры Д-572	9	0,6	0,07	0,07	0,01	
	Экскаваторы:						
	ЭКГ-12,5	10	9,6	6,60	1,92	1,32	
	ЭКГ-8и	3	1,8	1,19	0,36	0,24	
	Буровые станки:						
	СБР-160	2	3,2	1,72	0,16	0,09	
	СБШ-200	5	10,0	5,37	0,40	0,21	
СВБ-2	4	6,4	2,05	0,32	0,17		
	Всего:		1124,8	327,00	112,58	33,04	
ДППВ южный	Автосамосвалы БелАЗ-549	6	120	34,0	12,0	3,40	4000
ДППВ восточный	Автосамосвалы БелАЗ-549	6	120	34,0	12,0	3,40	4000
ДППУ	Углевозы	2	44	12,5	4,4	1,25	1680

Малые значения угла  $\alpha_2$  в холодный период подтверждают важность оценки воздухообмена в карьере с учетом вертикальной термической неоднородности атмосферы.

Данные об источниках пылевыведений и загазований воздуха, а также о содержании вредных примесей приведены в табл. 2, 3 и 4. Расчеты по первому варианту при  $\alpha_2 \approx 15^\circ$  показывают, что в теплый период года среднее содержание пыли всех фракций будет незначительно превышать предельно допустимую концентрацию (ПДК) и составит  $4,06 \text{ мг/м}^3$ , а фракций 10 мкм и менее —  $1,54 \text{ мг/м}^3$ , т. е. не будет превышать ПДК.

В холодное время года будет наблюдаться ухудшение воздухообмена даже при наличии на поверхности ветра той же скорости ( $u_0 = 3,2 \text{ м/с}$ ) за счет уменьшения угла  $\alpha_2$  раскрытия струи в карьерном пространстве. При этом средняя концентрация пыли всех фракций будет в 1,4 раза превышать ПДК и составит  $5,7 \text{ мг/м}^3$ , а фракций 10 мкм и менее —  $2 \text{ мг/м}^3$ , т. е., как и летом, не будет

**Характеристика естественного проветривания и загрязнения пылью  
воздушного пространства Центрального блока (за исключением участков  
дробильно-погрузочных пунктов) в зимний период  
при температурных инверсиях**

Показатели	Температурные условия		Без пылеподавления		С пылеподавлением	
	γ °С/100 м	t °С	пыль всех фрак- ций	пыль фрак- ций 10 мкм и менее	пыль всех фрак- ций	пыль фрак- ций 10 мкм и менее
Предельно допустимая интенсивность пылевыведения при скорости ветра 3,2 м/с, тыс. мг/с . . . . .	-3	-5			157	
		-40			154	
		-5			96	
Количество воздуха, поступающего на проветривание, тыс. м³/с . . . . .	-6	-40			94	
		-5			133	
		-40			130	
Ожидаемая средняя концентрация пыли при скорости ветра 3,2 м/с, мг/м³ . . . . .	-3	-5	10,5	3,4	1,50	0,79
		-40	10,7	3,5	1,52	0,80
		-5	16,8	5,3	2,14	0,98
Минимальная скорость ветра, необходимая для обеспечения санитарных норм по пылевому фактору, м/с . . . . .	-6	-40	17,1	5,4	2,17	0,99
		-5	6,01	2,62	1,06	0,32
		-40	6,08	2,84	1,24	0,39
	-3	-5	7,40	3,68	1,73	0,55
		-40	7,44	3,82	1,92	0,66

превышать ПДК. Минимальная скорость ветра, при которой запыленность будет достигать ПДК, в зимний период соответственно равна 4,7 и 1,4 м/с.

Таким образом, хотя карьерное пространство Центрального блока разреза после реконструкции первой очереди будет характеризоваться благоприятным соотношением глубины карьера и его длины в направлении преобладающего ветра ( $H/L < 0,1$ ), запыленность воздуха во внутрикарьерной атмосфере из-за значительной концентрации высокопроизводительного горного и транспортного оборудования при отсутствии средств пылеподавления будет часто достигать ПДК. Учитывая неравномерность распределения по карьере источников загрязнения и наличие зон рециркуляции, где будет наблюдаться пониженный воздухообмен, можно ожидать, что содержание пыли в воздухе застойных зон будет превышать предельно допустимые нормы. Это указывает на необ-

**Характеристика загрязнения атмосферы Центрального блока  
(за исключением участков дробильно-погрузочных пунктов) выхлопными  
газами двигателей внутреннего сгорания**

Показатели	Числовые значения
Суммарная мощность оборудования, л. с. . . . .	45 810
Мощность оборудования, расположенного в зоне загрязнения, л. с.:	
при равновесной стратификации атмосферы и скорости ветра на поверхности разреза 3,2 м/с . . . .	18 340
при температурной инверсии . . . . .	45 840
Минимальное количество чистого воздуха, необходимого для разжижения вредных газов до величины ниже ПДК, м <sup>3</sup> /с:	
при равновесной стратификации атмосферы и скорости ветра 3,2 м/с . . . . .	34 400
при температурной инверсии . . . . .	86 000
Количество воздуха, поступающего на проветривание за счет естественных сил, м <sup>3</sup> /с:	
при равновесной стратификации атмосферы . . . .	373 000
при инверсии с градиентом $\gamma = -3^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$	
$t = -5^{\circ}\text{C}$ . . . . .	114 400
$t = -40^{\circ}\text{C}$ . . . . .	114 100
при инверсии с градиентом $\gamma = -6^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$	
$t = -5^{\circ}\text{C}$ . . . . .	68 200
$t = -40^{\circ}\text{C}$ . . . . .	67 800

ходимость применения средств пылеподавления, особенно при работе автотранспорта, на долю которого приходится 95—97% суммарного выделения пыли, а также при работе буровых станков.

За счет применения средств обеспыливания концентрация пыли в атмосфере карьера в зимний период может быть снижена до величины в 2,2 раза ниже ПДК для всех фракций и в 4,55 раза ниже ПДК для фракций 10 мкм и менее. При этом минимальная скорость ветра на поверхности карьера  $u_{0 \text{ мин}}$ , при которой запыленность воздуха будет достигать ПДК, соответственно составит 1,2 и 0,35 м/с. В зонах рециркуляции и местах концентрации оборудования загрязнение воздуха выше ПДК будет наблюдаться при значительно больших скоростях ветра.

Расчеты также показывают, что в зимний период года загрязнение атмосферы карьера пылью всех фракций до ПДК даже при применении средств обеспыливания произойдет спустя 0,5 ч после возникновения штиля, а на участках интенсивного пылеобразования — еще раньше.

Особенно высокий уровень загрязнения воздуха следует ожидать в котлованах дробильно-погрузочных пунктов как по углю (ДППУ), так и по вскрыше (ДППВ), естественное проветривание которых происходит по рециркуляционной схеме (рис. 2).

Содержание вредных примесей в воздухе зависит не только от интенсивности источников загрязнения, скорости ветра и схемы проветривания карьера, но в большой степени определяется устойчивостью внутрикарьерной атмосферы. Так, например, данные наблюдений свидетельствуют о загрязнении атмосферы выше ПДК в Коркинском угольном карьере при ветре на поверхности более 6 м/с в периоды устойчивой атмосферы при температурных инверсиях. Поэтому формулы из работ [3, 4], применяемые при расчетах естественной вентиляции, справедливы только для атмосферы, у которой температура и давление не меняются с высотой. В случае неустойчивой атмосферы естественный воздухообмен будет протекать более интенсивно, в устойчивой атмосфере с отрицательными градиентами температуры интенсивность воздухообмена снижается.

В первом приближении можно принять, что проветривание карьера осуществляется за счет кинетической энергии ветра  $E_k$  и энергии неустойчивости внутрикарьерной атмосферы  $E_n$ , т. е.

$$E = E_k + E_n. \quad (1)$$

Тогда для реальной атмосферы количество воздуха, участвующего в проветривании карьера или отдельных зон карьерного пространства, равно

$$Q_p = Q_y n. \quad (2)$$

Здесь  $Q_y$  — количество воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), определенное по формулам [3, 4];  $n$  — безразмерный коэффициент, учитывающий ухудшение естественного воздухообмена в карьерах при температурных инверсиях:

$$n = \frac{\rho_y}{\rho_p} \frac{\frac{u_y^2}{2} + g \frac{T_a - T_y}{T_y} \Delta z_y}{\frac{u_p^2}{2} + g \frac{T_a - T_p}{T_p} \Delta z_p},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $u$  — скорость воздушного потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $T_a$ ,  $T$  — температура адиабатически поднимающегося и окружающего воздуха соответственно,  $\text{К}$ ;  $\Delta z$  — высота рассматриваемого слоя воздуха,  $\text{м}$ . Индекс «р» относится к реальной атмосфере, «у» — к условной, принятой в расчетах по [3, 4].

Величины  $\rho$ ,  $u$  и  $T$  в зависимости от рассматриваемого объекта являются средними по объему или сечению.

Материалы расчетов по формуле (2), представленные в табл. 3

и 4, свидетельствуют о существенном снижении количества воздуха, участвующего в проветривании карьера в периоды температурных инверсий. При инверсиях с вертикальными градиентами температуры  $-3$  и  $-6^{\circ}\text{C}/100$  м ожидается в первом приближении снижение интенсивности воздухообмена соответственно в 2,8 и 4,7 раза по сравнению с расчетами по [3, 4].

При указанной устойчивости атмосферы естественная вентиляция будет характеризоваться высокими значениями минимальной скорости ветра  $u_{0 \text{ мин}}$  на прилегающей к карьере территории, необходимой для обеспечения санитарных норм по пылевому фактору (табл. 3).

Следовательно, при отсутствии средств пылеподавления и  $\gamma = -3^{\circ}\text{C}/100$  м загрязнение воздуха выше ПДК при отработке первой очереди Центрального блока возможно при скорости ветра 2,6—6,1 м/с, а при  $\gamma = -6^{\circ}\text{C}/100$  м — даже при  $u_0 = 3,7 \div 7,4$  м/с. Применение средств пылеподавления при указанных значениях вертикальной температурной неоднородности не исключает опасного загрязнения воздуха пылью уже при скорости ветра 0,7—1,9 м/с.

В зонах рециркуляции загрязнение атмосферы будет протекать более интенсивно и характеризоваться значительно более высокими значениями концентрации пыли и минимально необходимой скорости ветра.

Основными источниками загрязнения атмосферы карьера вредными газами, как показывает анализ, будут двигатели внутреннего сгорания технологического оборудования. Причем из общей мощности работающего оборудования 55 520 л. с. на автосамосвалы БелАЗ-549 и углевозы приходится 99,5% мощности. Автосамосвалы БелАЗ-549 снабжаются двигателями УТМЗ-950А, углевозы — УТМЗ-1200А. По данным завода-изготовителя, эти двигатели на режиме номинальной мощности выделяют выхлопные газы в количестве соответственно 1,6 и 1,85 кг/с. Выхлопные газы содержат следующие компоненты: окись углерода — 0,195%, окислы азота — 0,0155%, углекислый газ — 7,5%, кислород — 10%, альдегиды — 1 мг/л; сажу — 0,35 мг/л.

Наши расчеты показали, что наибольшее количество воздуха для разбавления вредных примесей до величины ниже ПДК требуется по окислам азота.

Сравнение полученных величин потребного для разжижения вредных газов чистого воздуха (табл. 4) с рассчитанным количеством воздуха, поступающего естественным путем на проветривание, показывает, что при равновесной стратификации атмосферы и скорости ветра  $u_0 = 3,2$  м/с загрязнение внутрикарьерного воздуха в среднем будет ниже ПДК.

На участки дробильно-погрузочных пунктов по вскрыше (ДППВ) (и южный, и восточный) и по углю (ДППУ) поступает загрязненный воздух из выработанного пространства Центрального блока. Поэтому на участках ДПП в связи с высокой концентрацией автомашин воздух будет дополнительно интенсивно

загрязняться выхлопными газами, следовательно, здесь возможно загазование атмосферы даже при наличии ветра на поверхности и отсутствии инверсии.

Таким образом, на участках дробильно-погрузочных пунктов требуется принудительное проветривание.

В периоды инверсий с градиентом  $-3^{\circ}\text{C}/100$  м и при отрицательной температуре воздуха средняя концентрация вредных газов в атмосфере Центрального блока будет приближаться к ПДК, а при инверсиях с  $\gamma = -6^{\circ}\text{C}/100$  м будет превышать предельно допустимую величину. В местах скопления автосамосвалов содержание газов часто будет превышать ПДК и при  $\gamma = -3^{\circ}\text{C}/100$  м. Поэтому для Центрального блока в целом должны быть предусмотрены средства вентиляции, преимущественно для работы в зимний период года. При особо неблагоприятных метеорологических ситуациях (до 5—10 дней в году) должен осуществляться отстой карьера с выполнением в это время работ по профилактическому ремонту оборудования.

При температурных инверсиях, особенно зимой, взрывные работы не должны проводиться, если в это время не будут работать средства проветривания.

Загрязнение внутрикарьерной атмосферы пылью до концентраций, превышающих ПДК, возможно вследствие работы автотранспорта не только в холодный период года, но и летом в жаркое время, поэтому на автодорогах необходимо применение средств связывания пыли.

Эффективность естественного воздухообмена в карьере может быть повышена на 40—60% по сравнению с проектной за счет более рационального размещения внешних отвалов: ликвидации запроектированного Восточного и сооружения Южного и Западного отвалов в виде воздухозаборов, расположенных на флангах карьерного поля и усиливающих ветровой поток, направленный на карьер.

Таким образом, выполненный анализ позволил на стадии проектирования карьера предсказать периоды возможного ухудшения состояния атмосферы, оценить степень загрязнения внутрикарьерного воздуха, наметить меры по созданию нормальных атмосферных условий труда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов М. С., Ишукова Т. Л. Аэросиноптические условия загрязнения атмосферы Коркинского угольного карьера. — В кн.: Воздухообмен и микроклимат в карьерах. Челябинск, изд. НИИОГРа, 1969, с. 91—97.
2. Берлянд М. Е. Состояние и перспективы развития метеорологических исследований загрязнения атмосферы. — В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеоздат, 1971, с. 11—21.
3. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973. 184 с.
4. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. М., Госгортехиздат, 1963. 252 с.

5. Гершун О. С. Проветривание глубоких карьеров.— «Изв. Днепропетровского горного института», т. 31. Днепропетровск, изд. ДГИ, 1958, с. 81—87.
6. Загрязнение приземного слоя атмосферы при температурных инверсиях. Под ред. А. И. Бурназяна. М., «Медицина», 1969. 68 с.
7. Кочнев К. В., Филатов С. С. К вопросу об улучшении атмосферных условий в глубоких карьерах.— «Сб. работ по силикозу», вып. 2. Свердловск, изд. Уральского филиала АН СССР, 1960, с. 3—14.
8. Куликов В. П., Роголис Ю. П. Проветривание угольных разрезов. М., «Недра», 1973. 224 с.
9. Хандожко Л. А., Ишукова Т. Л., Ахметов М. С. Условия формирования дымок, задымления и туманов в Коркинском угольном карьере.— В кн.: Воздухообмен и микроклимат в карьерах. Челябинск, изд. НИИОГРа, 1969, с. 74—90.

*В. С. ИВАШКИН, В. Н. ЩЕРБАК, Е. П. ХАРИШИН*

## **АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ КОРКИНСКОГО КАРЬЕРА ОКИСЬЮ УГЛЕРОДА**

Основными внутренними источниками выделения окиси углерода на Коркинском разрезе являются эндогенные пожары. В отдельные периоды из горящих навалов, осыпей и целика угля в атмосферу карьера поступает до  $267 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более  $\text{CO}$ .

В зависимости от метеорологических условий происходит вынос или накопление вредных примесей в карьерном пространстве.

Наиболее интенсивное накопление  $\text{CO}$  в придонной части разреза характерно для холодного периода года при сочетании весьма неблагоприятных метеорологических условий. По данным за 1967—1971 гг., наличие окиси углерода чаще всего отмечается в ноябре, декабре и январе, реже в феврале и почти не наблюдается в марте и апреле. Из 1242 ч загрязнения за четыре холодных периода только 3 ч приходились на март (2 случая) и апрель (1 случай). В то же время продолжительность и число случаев, средняя концентрация  $\text{CO}$  не являются постоянными для одного месяца, а меняются в широких пределах в зависимости от погодных условий и интенсивности газовыделения. Максимальная продолжительность загрязнения наблюдалась в ноябре 1967 г. (262 ч), декабре 1968 г. (145 ч), январе и феврале 1969 г. (161 и 103 ч). В другие годы отмечались минимальные ее значения: 28 ч в декабре 1967 г., 20 ч в январе 1968 г., 2 ч в феврале 1970 г.

За рассматриваемые годы наибольшее число случаев и наибольшая продолжительность загрязнения отмечены в декабре.

В суточном ходе наиболее часто окись углерода отмечается в дневные часы (9—10 и 17 ч).

Максимальные значения средней концентрации наблюдаются в полночь, а минимальные — в 5—13 ч. В отдельные холодные периоды и месяцы отмечены существенные отклонения в суточном ходе показателей загрязнения.

Четко прослеживается зависимость загрязнения внутрикарьерной атмосферы от площади заповоженных участков. С уменьшением площади резко снижается уровень загрязнения. Эта зави-

симось лучше всего выражается уравнением параболы (для продолжительности, числа случаев загрязнения и средней концентрации СО корреляционное отношение соответственно равно 0,37; 0,43 и 0,82).

Значения показателей загрязнения распределяются очень неравномерно по глубине карьера, однако имеется тенденция к увеличению числа случаев загрязнения и повышению концентрации окиси углерода с углублением карьера. Наиболее высокие значения всех показателей загрязнения отмечаются в восточной и средней частях карьера, максимальная концентрация СО в западной части приходится на глубину 160—220 м, где сосредоточивается основная часть очагов пожаров и соответственно источников газовой выделений.

Уровень загрязнения внутрикарьерной атмосферы существенно зависит от скорости ветра. Чаще всего присутствие окиси углерода и концентрация ее более 0,0016% обнаруживаются при штиле и скорости ветра 1—3 м/с. Однако имеют место и случаи интенсивного загазования даже при скорости ветра до 7 м/с. Особенно часто это наблюдается при интенсивном выделении газов с заповаренных участков, когда вредные примеси не полностью выносятся из карьера, а частично перераспределяются в самом карьерном пространстве. В общем случае прослеживается закономерность — с увеличением скорости ветра на поверхности карьера уменьшаются показатели загрязнения. Особенно четко эта зависимость прослеживается с учетом повторяемости определенной скорости ветра (рис. 1).

Для выявления аналитической связи показателей загрязнения со скоростью ветра нами были использованы уравнения прямой, параболы и логарифмическая зависимость. Оказалось, что связь всех показателей загрязнения от скорости ветра, с учетом повторяемости каждого значения скорости, лучше всего описывается логарифмической зависимостью. Корреляционное отношение для числа случаев загрязнения равно 0,95—0,98, для средней концентрации 0,43—0,50, а ошибка аппроксимации соответственно 24—277 и 71—249.

Значения корреляционного отношения указывают на то, что зависимость числа случаев загрязнения от скорости ветра весьма существенна. Такая связь хуже для средней концентрации окиси углерода.

Уже в ранних исследованиях замечено влияние направления ветра на интенсивность накопления вредных примесей и выноса

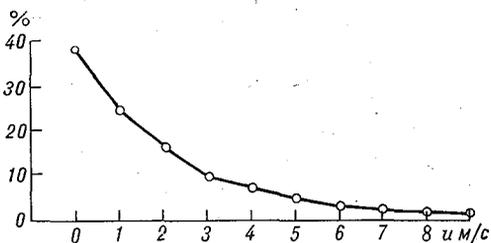


Рис. 1. Вероятность (%) загрязнения для различных скоростей ветра.

их из карьерного пространства. Поэтому обычно рекомендуют ориентировать длинную ось карьера в соответствии с господствующим направлением ветра. Однако при этом учитывается влияние только горно-технических факторов и не принимаются во внимание погодные условия и микроклимат карьеров. Между тем направление ветра тесно связано со знаком адвекции и поэтому сильно влияет на величину разности температур дно — поверхность. Ветры южных и западных направлений, при которых чаще всего наблюдается адвекция тепла, могут быть первопричиной формирования внутрикрьерных инверсий.

За период 1967—1971 гг. наибольшее число случаев загрязнения (68) воздушного бассейна Коркинского карьера наблюдалось при юго-западном ветре. Большое число случаев загрязнения связано с юго-юго-западным, южным и западным направлениями (соответственно 48, 39 и 34). Однако по этим данным трудно судить о вероятности загрязнения для рассматриваемого направления ветра, так как при этом не учитывается общая повторяемость ветра указанных направлений.

Высокая вероятность загрязнения наблюдается при юго-западном, западном и юго-юго-западном направлениях (22,4; 17,7 и 16,7%), а также при северо-западном и северо-северо-западном (9,7 и 9,4%). Она меньше при ветре южного направления по сравнению с юго-восточным, северо-северо-западным и северо-западным направлениями. Для западных ветров отмечаются сравнительно высокие значения как повторяемости, так и вероятности загрязнения.

В то же время по отдельным месяцам и годам имеются значительные отклонения от приведенных средних данных за указанный период. Так, в ноябре 1967 г. при ветровых потоках юго-западного, западо-юго-западного, западного, северо-западного и северо-северо-западного направлений имела место вероятность загрязнения соответственно 92, 100, 100, 82 и 100%. Как видно, вероятность загрязнения при юго-западном ветре была меньше, чем при западном и северо-северо-западном. В этом месяце наблюдалось 33 случая штилевой погоды. Однако загрязнение имело место только в 25 случаях, т. е. вероятность загрязнения при штиле равна 76%. В ноябре 1968 г. наблюдалось 30, 37, 33, 33 и 16 случаев ветра соответственно южного, юго-юго-западного, юго-западного, западного и северо-северо-западного направлений, а вероятность загрязнения равна 0, 3, 0, 12 и 6%. И здесь вероятность загрязнения при южном и юго-западном ветрах меньше, чем при западном и северо-северо-западном. В декабре 1967 г., ноябре 1968 и 1971 гг., январе 1968 и 1970 гг., феврале 1968, 1970 и 1971 гг. в воздушном бассейне карьера не зарегистрированы случаи наличия окиси углерода при штилевой погоде. Это указывает на то, что, кроме ветра, на загрязнение внутрикрьерной атмосферы значительное влияние оказывают и другие факторы, а также их сочетание.

На процессы накопления и выноса вредных примесей силь-

ное воздействие оказывает термический фактор. В воздушном бассейне Коркинского карьера зарегистрировано наличие окиси углерода в диапазоне изменения температур воздуха от  $-30$  до  $15^{\circ}\text{C}$  на поверхности и от  $-30$  до  $5^{\circ}\text{C}$  на дне карьера.

Для поверхности и дна карьера максимальное число случаев загрязнения соответствует температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ , а наиболее высокие концентрации окиси углерода чаще всего наблюдаются при  $0^{\circ}\text{C}$ .

Зависимость числа случаев загрязнения от температуры воздуха лучше всего описывается законом нормального распределения. Этот закон значительно хуже выражает зависимость средней концентрации  $\text{CO}$ .

Загрязнение воздуха внутри-карьерного пространства происходит как при положительном, так и при отрицательном радиационном балансе на поверхности и дне карьера. Однако максимальное число случаев загрязнения и концентраций  $\text{CO}$ , равных  $0,0016\%$ , соответствует отрицательным значениям разности температуры почва — воздух ( $-2^{\circ}\text{C}$  на поверхности карьера и  $-3,0^{\circ}\text{C}$  на дне). Повышенное содержание в воздухе  $\text{CO}$  на температур  $2-3^{\circ}\text{C}$  на поверхности и  $1^{\circ}\text{C}$  на дне карьера (рис. 2).

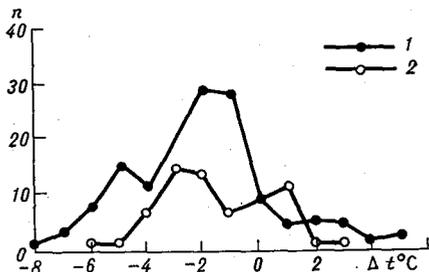


Рис. 2. Зависимость числа случаев загрязнения от разности температур почва — воздух:

1 — на поверхности карьера, 2 — на дне.

Максимум числа случаев загрязнения по всем данным соответствует разности температур  $-4^{\circ}\text{C}$ , а наиболее высокие средние концентрации окиси углерода наблюдаются при  $-7, -4^{\circ}\text{C}$ .

Проверка значимости влияния разности температур' дно — поверхность (устойчивости внутрикарьерной атмосферы) выполнена путем построения различных математических моделей, оценки их по корреляционному отношению  $\eta$ ,  $F$ -критерию (Фишера) и  $t_{\eta}$ -критерию, а также путем сравнения с влиянием других факторов. Исследовались зависимости  $y_1, y_2 = f(x_1, x_2)$  и  $y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$  по данным загрязнения при штилевой погоде, чем исключалось влияние ветра и направления ветрового потока. Здесь  $y_1, y_2$  — соответственно средняя и максимальная концентрации окиси углерода в карьере, наблюдаемые в данное время;  $x_1$  — площадь пожаров,  $10^3 \text{ м}^2$ ;  $x_2 = \frac{\Delta t}{t_0} \frac{\Delta p}{p_0}$  — параметр, учитывающий вертикальную устойчивость атмосферы;  $\Delta t, \Delta p$  — разность температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и давления (мб) дно — поверхность;  $t_0, p_0$  — температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) и давление (мб) на дне карьера;  $x_3 = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{\Delta p}{p_0}$  — параметр, учитывающий изменение влажности дно — поверхность;

$\Delta f$  — разность значений относительной влажности дно — поверхность, %;  $f_0$  — относительная влажность на дне карьера, %;  $x_4$  — коэффициент, учитывающий облачность. Для безоблачного состояния неба принимался равным 0,001.

Отношение  $\frac{\Delta p}{p_0}$  вводилось в связи с тем, что пункт метеорологических наблюдений на дне в процессе разработки и углубления карьера менял свое расположение, а также для учета изменения давления при различных погодных условиях.

Функциональные зависимости аппроксимировались полиномом второй степени и степенной зависимостью  $y = a_0 x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n}$ . Сравнение результатов расчетов по указанным вариантам показало, что наиболее приемлемой по статистическим характеристикам является аппроксимация полиномом второй степени. При аппроксимации зависимости  $y_1 = f(x_1, x_2)$  факторы  $x_1$  и  $x_2$  оказались мало значимыми.

Наиболее существенно влияние факторов при сочетании  $x_1, x_2$  ( $t_\eta = 3,63 > t_{\eta \text{табл}} = 2,04$ ), т. е. сочетание интенсивности газовыделения со степенью вертикальной устойчивости атмосферы.

Аппроксимация зависимостей  $y_2 = f(x_1, x_2)$  и  $y_2 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$  показала весьма существенное влияние вертикальной устойчивости внутрикарьерной атмосферы, интенсивности газовыделения, а также их сочетаний на процессы накопления окиси углерода в карьере. Существенно и влияние сочетания интенсивности газовыделения с характером облачности.

Таким образом, анализ случаев загрязнения атмосферы Коркинского карьера позволяет сделать следующие выводы.

1. Загрязнение характерно для холодного периода года и имеет суточный ход.

2. На интенсивность воздухообмена, а следовательно, на вынос вредных примесей оказывают влияние большое число факторов, из которых основными являются интенсивность газовыделения, устойчивость внутрикарьерной атмосферы, скорость и направление воздушного потока, а также сочетания этих факторов. Существенным является влияние сочетания интенсивности газовыделения с характером облачности.

*И. И. ИВАНОВ*

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В КАРЬЕРЕ**

Одними из основных элементов, формирующих тепловой режим в карьере, являются горные породы и температурная стратификация воздуха в приземном слое. Непрерывные процессы теплообмена на раздэле почва — воздух являются естественным регулятором их теплового режима. В процессе разработки карьера, при его углублении, соответственно изменяется и характер их взаимодействия.

В общем случае геотермическое поле карьера является нестационарным. Однако для гелиотермозоны, где проявляются годовые колебания температуры, расчет можно проводить по среднегодовым данным с учетом периодической составляющей температурной волны, а для термозоны, расположенной ниже «нейтрального слоя», такие колебания в годовом цикле отсутствуют. Таким образом, геотермическое поле карьера в целом можно рассматривать как квазистационарное [1], а для гелиотермозоны полученное квазистационарное решение суммировать с периодической составляющей.

Для оценки степени влияния геотермического режима и температурной стратификации приземного слоя воздуха на тепловой режим карьера на различных стадиях его разработки были проведены исследования с применением метода математического моделирования, выполненные на электроинтеграторе ЭГДА-9/60. В качестве проводящей среды использовалась электропроводная бумага (ЭПБ) с сопротивлением «на квадрат» 500—1500 Ом. Граничные условия задавались с помощью системы шин, питаемых от выпрямителя моделирующего прибора, а измерение электрических потенциалов осуществлялось мостовым методом.

Методика моделирования плоских задач на электроинтеграторе ЭГДА-9/60 подробно изложена в работе П. Ф. Фильчакова

и В. И. Панчишина [2], где показано, что при моделировании уравнения Лапласа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

потенциальным электрическим полем в проводящей среде ЭПБ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \sigma_x \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \sigma_z \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = 0 \quad (2)$$

необходимо соблюдать условия геометрического подобия рассматриваемых областей, подобие граничных условий и подобие теплопроводящих и электропроводных сред. Для однородной среды условие подобия полей имеет место при любом значении удельной проводимости ЭПБ ( $\sigma$ ) и при моделировании выполняется автоматически, т. е. для анализа однородной теплопроводящей среды с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  можно применять ЭПБ практически любого номинала. Масштаб температуры при этом выбирается произвольно, с учетом граничных условий рассматриваемой задачи.

Особенностью моделирования рассматриваемой задачи для карьера является неопределенность верхней границы теплового поля приземного слоя воздуха, строгое задание которой на модели не представляется возможным. Здесь в первую очередь следует назвать зависимость этой границы от температурной стратификации и изменение ее во времени и пространстве и, во-вторых, необходимо учитывать степень деформации теплового поля приземного слоя воздуха за счет карьера как углубления в земной коре. Поэтому при моделировании первый фактор учитывался введением дифференциации всех экспериментов по степени устойчивости атмосферы приземного слоя, характеризуемого величиной вертикального температурного градиента  $\gamma_v = -\frac{\partial t}{\partial Z}$ . При моделировании последовательно задавались адиабатическое ( $\gamma_v = 0,01^\circ\text{C}/\text{м}$ ), изотермическое ( $\gamma_v = 0$ ) и инверсионное ( $\gamma_v = -0,01^\circ\text{C}/\text{м}$ ) распределения температуры на поверхностной площадке карьера. Второй фактор учитывался на основании результатов производственных геотермических исследований [3, 4], при этом величина вертикального температурного градиента поверхности почвы карьера  $\gamma_{\text{п}} = \frac{\partial t_{\text{п}}}{\partial Z}$  варьировалась в диапазоне от 0 до  $0,03^\circ\text{C}/\text{м}$ , а особенности теплового режима на отдельных бортах не учитывались.

Для оценки изменения теплового поля приземного слоя воздуха под влиянием карьера было проведено контрольное моделирование распределения температуры на большом листе ЭПБ ( $680 \times 560$  мм). Затем к контрольному листу электропроводным клеем подклеивались соответствующие модели карьерного пространства с величиной относительной глубины  $p = 0,25; 0,50$  и  $0,75$ . Хотя реальная относительная глубина карьера (отношение глу-

бины к среднему размеру по поверхности) из условия исключения прямого скатывания по уступу горной породы ограничивается значением  $\rho_{\max}=0,50$ , что соответствует максимальному углу уступа карьера  $\beta=45^\circ$ , для моделирования принималось также значение  $\rho=0,75$ . Это позволило проследить на несколько большем интервале изменения  $0 < \rho < 1$  динамику температурного режима в карьере на различных стадиях его отработки. При этом карьерное пространство аппроксимировалось в сечении равнобедренным треугольником с основанием  $L$  и глубиной  $H$ , а размеры модели приземного слоя воздуха превышали линейные размеры

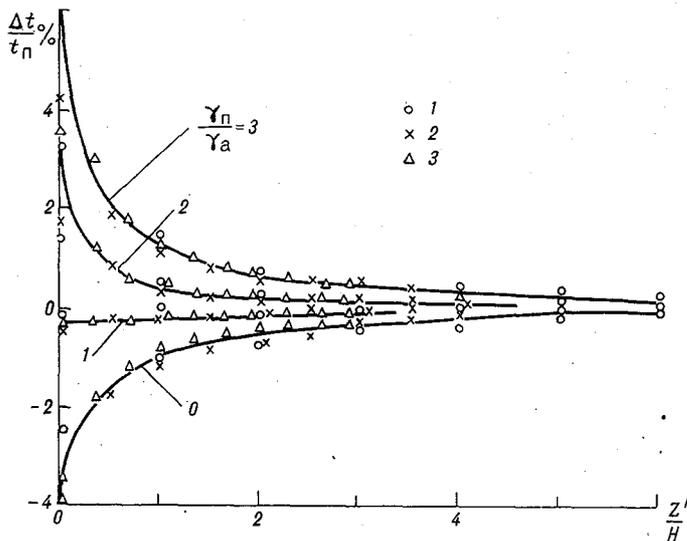


Рис. 1. Влияние карьера относительной глубины  $\rho$  на изменение температуры в приземном слое воздуха.  
1)  $\rho=0,25$ ; 2)  $\rho=0,50$ ; 3)  $\rho=0,75$ .

наибольшей модели карьерного пространства примерно на порядок, что позволяло предположить отсутствие на верхней границе слоя искажающего влияния карьера на распределение температуры воздуха [5].

По вертикальной оси  $OZ$ , проходящей через точку наибольшей глубины карьера, проводились измерения температуры по высоте слоя при отсутствии карьера ( $t'$ ) и при наличии ( $t$ ). Затем вычислялись величина абсолютного приращения  $\Delta t = t - t'$  в данной точке и ее относительное значение, нормированное значением температуры поверхности почвы  $t_{\text{п}} \approx \frac{\Delta t}{t_{\text{п}}}$ . Результаты моделирования для адиабатического распределения температуры приземного слоя воздуха при переменном значении градиента температуры поверхности почвы ( $\gamma_{\text{п}}$ ) приведены на рис. 1, из которого

видно, что на высоте, составляющей примерно три глубины карьера, искажение температуры воздуха за счет влияния карьера составляет не более 0,5% значения температуры поверхности почвы. Поэтому, принимая размеры модели приземного слоя воздуха  $Z' \geq 3H$  и задавая на верхней границе ее изотермические условия, соответствующие требуемому значению температурной стратификации слоя воздуха, получим, что допускаемая при этом погрешность задания граничных условий не будет превышать 0,5%, что вполне приемлемо при решении подобных задач.

Проведение моделирования квазистационарного теплового режима карьерного пространства предусматривало оценку изменения величины среднего значения температурного градиента в слое дно — поверхность карьера ( $\bar{\gamma}$ ) в зависимости от относительной глубины карьера ( $p$ ), температурной стратификации приземного слоя воздуха вне карьера ( $\gamma_b$ ) и величины вертикального температурного градиента поверхности почвы ( $\gamma_n$ ). Из ЭПБ вырезалась соответствующая модель карьерного пространства. Затем из аналогичной ЭПБ подготавливалась модель приземного слоя воздуха. Высота ее и ширина принимались во всех случаях постоянными и равными утроенному значению соответственно глубины и размера по поверхности наибольшей модели карьера. Склеивание моделей проводилось электропроводным клеем.

Задание граничных условий осуществлялось с учетом принятого масштаба температур  $M_t = \frac{t}{\varphi} = 0,5^\circ\text{C}/\text{В}$ . При этом потенциал на верхней границе модели, с учетом температурной стратификации  $\varphi' = \frac{t_n - \gamma_b Z'}{M_t}$ , задавался с помощью линейных шин от блока делителей напряжения электроинтегратора. Граничное условие, соответствующее разделу почва — воздух на глубине  $Z=0$ , т. е. вне карьера,  $\varphi_0 = \frac{t_n}{M_t}$  задавалось аналогичным образом с помощью линейных шин от блока делителей напряжения, а распределение потенциала в модели карьерного пространства  $\varphi_Z = \frac{t_n + \gamma_n Z}{M_t}$  осуществлялось с помощью специальной шины, у которой потенциал линейно изменяется по ее длине в зависимости от принятого закона изменения величины  $\gamma_n$ .

Среднее значение температурного градиента в пределах карьерного пространства ( $\bar{\gamma}$ ) на модели, с учетом масштаба температуры ( $M_t$ ), оценивалось величиной разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_H - \varphi_0$ , где  $\varphi_H$  — значение потенциала на глубине  $Z=H$ , а  $\varphi_0 \sim$  на глубине  $Z=0$ , т. е. на уровне земной поверхности. При обработке численные значения  $\bar{\gamma}$  нормировались с помощью величины адиабатического градиента ( $\gamma_a = 0,01^\circ\text{C}/\text{м}$ ).

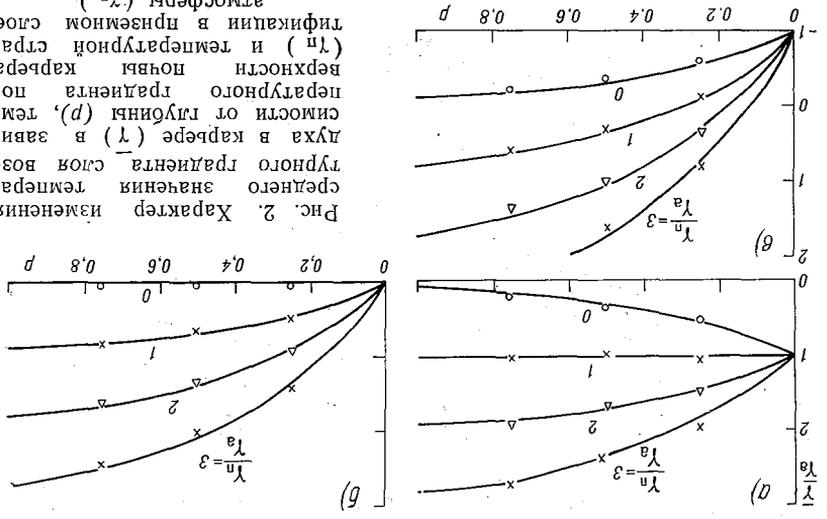
Результаты моделирования для фиксированных значений  $\gamma_b/\gamma_a = -1$  (инверсия),  $\gamma_b/\gamma_a = 0$  (изотермия) и  $\gamma_b/\gamma_a = 1$  (адиабатическое распределение температуры) при  $\gamma_n/\gamma_a = 0, 1, 2$  и 3 соответственно представлены на рис. 2 функцией безразмерной глу-

С возрастанием глубины карьера более ошутимо начинает проявляться влияние геотермического режима карьера, опреде-

в пределах карьерного пространства определяется значениями вертикального температурного градиента поверхности почвы ( $\gamma^в$ ) и величинной температурной стратификации в приемном слое воздуха ( $\gamma^а$ ). С изменением относительной глубины карьера ( $d$ ) среднее значение температурного градиента ( $\lambda$ ) изменяется по экспоненциальному закону. Для начального этапа разработки карьера ( $d \rightarrow 0$ ) значение  $\lambda \rightarrow \gamma^в$ , т. е. для мелких карьеров среднее значение температурного градиента воздуха в карьере зависит только от значения температурной стратификации на поверхности пло-

атмосферы ( $\gamma^в$ ).  
 $(a) \gamma^в/\gamma^а = 1; (b) \gamma^в/\gamma^а = 0,8$

Рис. 2. Характер изменения среднего значения температуры воздуха в карьере ( $\lambda$ ) в зависимости от глубины ( $d$ ), температурной стратификации в приемном слое воздуха и температурной стратификации в приемном слое атмосферы ( $\gamma^в$ ).



При обработке экспериментальных данных получено численное значение постоянного коэффициента экспоненты  $p_0$ , которое для всех кривых при аппроксимировании профиля карьера равнобедренным треугольником составляет  $p_0 = 0,43$ . Как показывается анализ уравнения (4) и как видно из рис. 2, распределение температуры

$$(4) \quad \frac{\lambda}{\gamma^в} = \frac{\gamma^а}{\gamma^в} + \frac{\gamma^а}{\gamma^в - \gamma^а} (1 - e^{-p_0 d}).$$

или в нормированном виде

$$(3) \quad \lambda = \gamma^в + (\gamma^а - \gamma^в)(1 - e^{-p_0 d})$$

Полученные результаты хорошо аппроксимируются уравнением

распределением температуры поверхности карьера. Теоретически при  $p \rightarrow \infty$ , как это видно из уравнения (4), значения  $\bar{y} \rightarrow y_m$ , т. е. для весьма глубоких карьеров температурная стратификация воздуха в них зависит только от распределения температуры почвы по глубине. Для наиболее распространенных карьеров ( $0 < p < 0,5$ ) величина  $\bar{y}$  определяется взаимным сочетанием  $y_a$  и  $y_m$ .

Для более наглядного представления о влиянии геотермического режима на тепловой режим в карьере на рис. 3 результаты расчетов  $\bar{y}/y_a$  представляемы в зависимости от  $y_m/y_a$  при  $p = \text{const}$ . Как видно из рисунка, значения  $\bar{y}$  прямо пропорциональны величине  $y_m$  и возрастают при переходе от инверсии к изотермии и от нее к адвективной стратификации на поверхности карьера. При этом наибольшим значениям относительной глубины соответствуют меньший разброс семейства графиков  $\bar{y}/y_a = \text{const}$  и наибольшее воз-

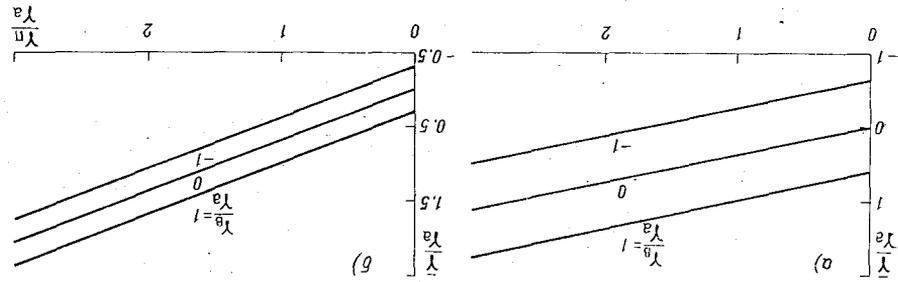


Рис. 3. Изменение среднего значения температурного градиента воздуха в карьере ( $\bar{y}$ ) в зависимости от величины градиента температуры поверхности почвы ( $y_m$ ). а)  $p=0,2$ ; б)  $p=0,5$ .

растание  $\bar{y}/y_a$  с увеличением  $y_m/y_a$ , т. е. в глубоких карьерах влияние температурной стратификации на поверхность карьера на тепловой режим снижается и возрастает влияние геотермического режима. Эти выводы аналогично вытекают и из анализа уравнения (4). Действительно, при  $p = \text{const}$  уравнение (4) можно записать относительно  $y_m/y_a$  как линейное

$$\frac{\bar{y}}{y_a} = A + B \frac{y_m}{y_a}, \quad (5)$$

$$A = \frac{y_a}{y_m} e^{-p/y_m} \text{ и } B = 1 - e^{-p/y_m}.$$

Так как при  $p = \text{const}$   $e^{-p/y_m} = \text{const}$ , то и  $B = \text{const}$ , а величина коэффициента  $A$  пропорциональна значению  $y_m$ . Однако не смотря на возрастание  $\bar{y}$  в карьере с увеличением глубины, при

где

наиболее реальных  $\frac{\gamma_n}{\gamma_a} = 0 \div 1$  и  $p \leq 0,5$  преобладающей в пределах карьерного пространства является стратификация, характеризуемая соотношением  $\bar{\gamma}/\gamma_a < 1$ , т. е. среднее значение температурного градиента в пределах карьерного пространства меньше величины адиабатического градиента, что свидетельствует о дефиците тепловой энергии в карьере и способствует формированию инверсионной структуры воздуха.

Для оценки влияния температурной стратификации ( $\gamma_b$ ) на тепловой режим карьера преобразуем уравнение (4) относительно  $\bar{\gamma}/\gamma_a$  при  $p = \text{const}$ . В этом случае

$$\frac{\bar{\gamma}}{\gamma_a} = C + D \frac{\gamma_b}{\gamma_a}, \quad (6)$$

где

$$C = \frac{\gamma_n}{\gamma_a} (1 - e^{-p/\rho_0}) \text{ и } D = e^{-p/\rho_0}.$$

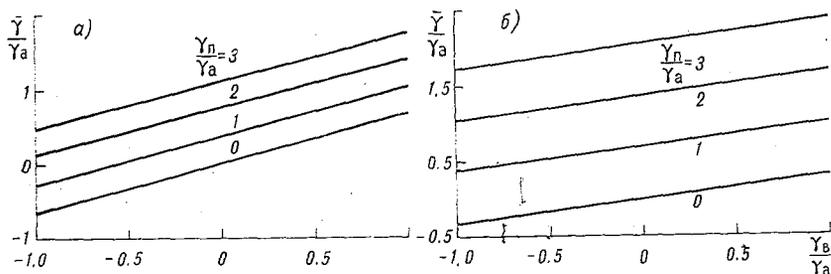


Рис. 4. Изменение среднего значения температурного градиента воздуха в карьере ( $\bar{\gamma}$ ) в зависимости от значения температурной стратификации воздуха в приземном слое атмосферы ( $\gamma_b$ ).

а)  $p=0,2$ ; б)  $p=0,5$ .

Результаты расчетов по формуле (6) для  $p=0,2$  и  $0,5$  представлены на рис. 4. Из уравнения (6) и рис. 4 видно, что температурная стратификация воздуха в карьере для любой постоянной глубины  $p$  линейно зависит от  $\gamma_b$ . При углублении карьера значение коэффициента  $D$  уменьшается, что свидетельствует о снижении влияния  $\gamma_b$  на  $\bar{\gamma}$  при увеличении  $p$ . С другой стороны, увеличение глубины  $p$  ведет к возрастанию коэффициента  $C$ , т. е. в более глубоком карьере значения  $\bar{\gamma}$  возрастают, что является проявлением влияния геотермического режима.

Таким образом, проведено исследование по оригинальной методике квазистационарного теплового поля карьерного пространства на различных стадиях его разработки с помощью электроинтегратора ЭГДА-9/60 на электропроводной бумаге с учетом геотермического режима и температурной стратификации приземно-

го слоя воздуха на поверхности. Получено аналитическое выражение, характеризующее изменение среднего температурного градиента слоя воздуха в карьере. Анализ полученного уравнения показал следующее.

1. С возрастанием глубины карьера среднее значение температурного градиента слоя воздуха в нем изменяется по экспоненциальному закону. Постоянный коэффициент экспоненты  $p_0=0,43$ .

2. Для любой стадии разработки значение температурного градиента воздуха в карьере определяется сочетанием величин градиента температуры поверхности горных пород карьера и температурной стратификацией в приземном слое атмосферы.

3. Для мелких карьеров температурный градиент воздуха в карьере полностью определяется значениями температурной стратификации приземного слоя атмосферы.

4. В глубоких карьерах определяющее влияние на распределение температуры воздуха по глубине приобретает геотермический режим.

5. Для определенной глубины карьера и неизменных условий в приземном слое атмосферы величина температурного градиента воздуха в карьере прямо пропорциональна градиенту температуры поверхности почвы. При постоянных значениях глубины и градиента температуры поверхности почвы карьера среднее значение температурного градиента воздуха в нем прямо пропорционально величине температурной стратификации в приземном слое атмосферы.

6. Вследствие сокращенного притока солнечной радиации к бортам карьера и формирования температурных градиентов поверхности почвы, близких к нулю (особенно в зимний период года), в карьере формируются температурные градиенты воздуха, меньшие, чем величина адиабатического градиента, а при изотермической или инверсионной структуре воздуха на поверхности в карьере имеет место инверсионное распределение температуры воздуха, т. е. карьер находится при этом в условиях дефицита тепловой энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. М., «Недра», 1968. 316 с.
2. Фильчаков П. Ф., Панчишин В. И. Интеграторы. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. Киев, Изд-во АН УССР, 1961. 172 с.
3. Иванов И. И. О геотермических исследованиях в карьерах.—«Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 73—84.
4. Иванов И. И. Исследование геотермического режима карьеров.— В кн.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 25—35.
5. Кутас Р. И. Оценка искажающего влияния рельефа на геотермические параметры.— «Геофизический сб.», 1964, вып. 9 (11), с. 107—113.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ НА ВОЗДУХООБМЕН В КАРЬЕРАХ

Одной из центральных задач проблемы улучшения атмосферных условий в карьерах является прогнозирование естественной вентиляции, первые успешные попытки решения которой относятся к началу 60-х годов. До последнего времени широко применяются методы оценки естественного воздухообмена [1], основывающиеся на теории плоско-параллельной струи [2], где принято условие:  $T=f(z)=\text{const}$ ,  $p=f(z)=\text{const}$ , т. е. температура  $T$  и давление  $p$  не изменяются по высоте  $z$ . Экспериментальные данные, накопленные впоследствии [3], указывают на то, что расчеты движения воздуха по известным схемам (прямоточной, рециркуляционной) не учитывают изменчивости масштаба турбулентности.

Сопоставление аналитически рассчитанной связи  $u_z/u_0$  — отношения скоростей воздушных потоков в карьере к скорости ветра на поверхности — с безразмерной переменной  $\varphi(x, y)$  — координатами точки, в которой определяется продольная составляющая скорости, и этих же зависимостей по данным наблюдений в Коркинском карьере [4, 5] показывают, что расхождение между теоретическими и экспериментальными профилями довольно большое. Таким образом, предположение, что формулы в [1] могут быть успешно использованы только для условий изотермической атмосферы, подтверждается. Естественно, расчеты воздухообмена по формулам для отличной от принятой вертикальной устойчивости атмосферы будут давать результаты, существенно отличающиеся от действительных. Различие будет увеличиваться с повышением степени устойчивости или неустойчивости состояния атмосферы.

В задачу настоящей работы входит получение формул для расчетов количества воздуха  $Q$  и интенсивности загрязнения  $G$ , учитывающих температурную стратификацию.

Энергия неустойчивости принятой условной атмосферы примерно равна энергии неустойчивости изотермической атмосферы, у которой вертикальный градиент температуры  $\gamma=0$ .

Зависимость интенсивности естественного воздухообмена не только от ветра, но и от вертикальной устойчивости атмосферы подтверждается результатами наших исследований в Коркинском карьере, проведенными совместно с ГГО и ЛГМИ. Из анализа загрязнения внутрикарьерного воздуха следует, что при развитой вертикальной устойчивости атмосферы наблюдаются случаи загрязнения отдельных зон карьера окисью углерода выше уровня ПДК даже при скоростях ветра на поверхности 6—8 м/с.

Как показали исследования, в общем случае проветривание карьера осуществляется за счет кинетической энергии ветра  $E_k$  и энергии неустойчивости атмосферы  $E_n$ :

$$E = E_k + E_n, \quad (1)$$

которые определяются из известных уравнений

$$E_k = \frac{Mu^2}{2},$$

$$E_n = \int g \rho V \frac{T_a - T}{T} \Delta z,$$

*где  $M$  — масса воздуха* (2)  
*с массой воздуха* (3)

где  $M$  — масса воздуха, участвующего в проветривании ( $M = \rho V$ ), кг;  $u$  — результирующая скорость воздушного потока, м/с;  $V$  — объем воздуха, участвующего в проветривании ( $V = Qt$ ), м<sup>3</sup>;  $T_a$  — температура адиабатически поднимающегося воздуха, К;  $T$  — температура окружающего воздуха, К;  $\Delta z$  — высота подъема ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ), м;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

С учетом (1)—(3) после несложных преобразований энергия воздухообмена для условий близкой изотермической и реальной атмосферы будет соответственно определяться выражениями

$$E_n = \rho_n V_n \left[ \left( \frac{u_n}{\sqrt{2}} \right)^2 + g \frac{T_a - T_n}{T_n} \Delta z_n \right], \quad (4)$$

$$E_p = \rho_p V_p \left[ \left( \frac{u_p}{\sqrt{2}} \right)^2 + g \frac{T_a - T_p}{T_p} \Delta z_p \right], \quad (5)$$

где  $u = u_0 \Phi$ ,  $u_0$  — скорость невозмущенного потока (в начале координат),  $\Phi$  — функция распределения безразмерной скорости потока по сечению или объему. Индекс «и» относится к близкой изотермической, а «р» — к реальной атмосфере.

Решая (4) и (5) при  $E_n = E_p$  относительно объема воздуха и времени проветривания, получим

$$\frac{V_p}{V_n} = n. \quad (6)$$

Здесь

$$n = \frac{\rho_n \left[ \left( \frac{u_n}{\sqrt{2}} \right)^2 + g \frac{T_a - T_n}{T_n} \Delta z_n \right]}{\rho_p \left[ \left( \frac{u_p}{\sqrt{2}} \right)^2 + g \frac{T_a - T_p}{T_p} \Delta z_p \right]}. \quad (7)$$

Тогда количество воздуха, протекающее в единицу времени, рассчитывается по формуле, имеющей вид

$$Q_p = nQ_n. \quad (8)$$

По аналогии с (8) для интенсивности загрязнения имеем

$$G_p = G_n n. \quad (9)$$

Для выявления физического смысла  $n$  воспользуемся известным соотношением

$$T = T_0 + \gamma \Delta z, \quad (10)$$

где  $T_0$  — температура воздуха на исходном уровне;  $\gamma$  — вертикальный градиент температуры, °C/100 м.

После подстановки (10) в (7) и несложных преобразований получим

$$n = \frac{\rho_n T_p}{\rho_p T_n} \left( \frac{\Delta z_n}{\Delta z_p} \right)^2 \frac{\left( \frac{u_n}{\sqrt{2} \Delta z_n} \right)^2 \frac{T_n}{g} + \gamma_a}{\left( \frac{u_p}{\sqrt{2} \Delta z_p} \right)^2 \frac{T_p}{g} + \gamma_a - \gamma_p}. \quad (11)$$

Так как  $[(u/\sqrt{2}\Delta z)^2 T/g]$  по сути дела является средним по объему ветровым эквивалентом вертикального градиента температуры при соответствующей устойчивости атмосферы, т. е.

$$\gamma_{dn} = \left( \frac{u_n}{\sqrt{2} \Delta z_n} \right)^2 \frac{T_0}{g},$$

$$\gamma_{dp} = \left( \frac{u_p}{\sqrt{2} \Delta z_p} \right)^2 \frac{T_p}{g},$$

тогда (11) запишется в виде

$$n = \frac{\rho_n T_p}{\rho_p T_n} \left( \frac{\Delta z_n}{\Delta z_p} \right)^2 \frac{\gamma_{dn} + \gamma_a}{\gamma_{dp} - \gamma_p + \gamma_a}. \quad (12)$$

Согласно [4], величина  $\gamma_a$  при скоростях ветра  $u \leq 3$  м/с невелика и ее вклад в развитие турбулентности мал. При ветре 3—6 м/с величина  $\gamma_a$  в холодный период года часто превышает  $1 \cdot 10^{-2}$ , а на бровке карьера достигает даже  $2,5 \cdot 10^{-2}$ , что соответствует сильной термической неустойчивости массы воздуха в этом слое и может способствовать развитию значительной турбулентности.

Для вертикальной неустойчивости атмосферы, характеризующейся вертикальными градиентами температуры  $\gamma_p > 0$ , параметр  $n > 1$  и снижение концентраций вредных примесей за счет естественных сил будет осуществляться большими количествами воздуха и за меньший промежуток времени, чем при принятой условной атмосфере, т. е.  $Q_p > Q_n$ ,  $t_p < t_n$ . Для атмосферы, имеющей инверсионный ход распределения температуры ( $\gamma_p < 0$ ),  $n < 1$ .

Снижение концентрации примесей осуществляется меньшими количествами воздуха и время процесса проветривания увеличивается, т. е.  $Q_p < Q_n$ ,  $t_p > t_n$ .

В теории плоско-параллельной струи пренебрегают силами плавучести — принимается условие, что подъем и опускание частиц происходит без принужденных энергетических затрат (по адиабате). В этом случае член  $g(T_a - T_n/T_n)\Delta z_n = 0$ , так как работа по преодолению устойчивости производиться не будет. Следовательно, параметр  $n$  для указанного условия определяется по формуле

$$n = \frac{\rho_n T_p}{\rho_p \Delta z_p^2} \frac{\left(\frac{u_n}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left(\frac{u_p}{\sqrt{2}}\right)^2 + g \frac{T_a - T_p}{T_p} \Delta z_p} \quad (13)$$

или

$$n = \frac{\rho_n T_p}{\rho_p \Delta z_p^2} \frac{\left(\frac{u_n}{\sqrt{2}}\right)^2}{(\gamma_{dp} + \gamma_a - \gamma_p)} \quad (14)$$

Расчет количества воздуха можно производить для фиксированных и изменяющихся по высоте границ воздушного потока. В первом случае  $\Delta z_n = \Delta z_p$ , во втором  $\Delta z_n > \Delta z_p$  для инверсионного состояния и  $\Delta z_n < \Delta z_p$  для неустойчивого, т. е. при инверсии угол расширения струи уменьшается, а при неустойчивом состоянии увеличивается. Результирующую скорость потока можно рассчитать по известным формулам [7] или же (наилучший вариант, но не всегда возможный) по данным натуральных исследований.

При расчете воздухообмена широко используется формула

$$Qt = \frac{V_k}{k} \ln \frac{G + G' - kQc_0}{G + G' - kQc} \quad (15)$$

где  $V_k$  — объем карьера или его рассматриваемой части, м<sup>3</sup>;  $k$  — безразмерный коэффициент, учитывающий отношение средней концентрации примесей в воздухе, удаляемом из карьерного пространства, к средней концентрации в его объеме;  $G$  — суммарная интенсивность выделения вредных примесей в карьере, мг/с;  $G'$  — интенсивность притока загрязняющих примесей с воздухом, поступающим в карьер извне, мг/с;  $c_0, c$  — начальное и текущее значения концентрации примесей в карьере, мг/м<sup>3</sup>.

Подставляя (15) в (6) и решая относительно  $k$ , с учетом изложенных соображений применительно к реальной атмосфере, получим

$$k_p = nk_n \frac{\ln \frac{G + G' - k_n Q_n c_{0n}}{G + G' - k_n Q_n c_n}}{\ln \frac{G + G' - k_p Q_p c_{0p}}{G + G' - k_p Q_p c_p}} \quad (16)$$

Для условия проветривания после разового загрязнения и достижения определенной концентрации при равенстве начальной ( $c_{0н} = c_{ор}$ ,  $c_p = c_n$ )

$$k_p = k_n n. \quad (17)$$

В случае неустойчивой атмосферы ( $n > 1$ ,  $k_p > k_n$ ) при прочих равных условиях процесс проветривания будет протекать с меньшими затратами количества воздуха и за более короткий промежуток времени. При инверсиях ( $n < 1$ ,  $k_p < k_n$ ) процесс проветривания будет осуществляться с большими затратами количества воздуха и за больший промежуток времени.

По формулам (7)—(9) одним из авторов настоящей статьи (В. Н. Щербак) выполнена оценка загрязнения отдельных зон и всего воздушного бассейна первой очереди реконструкции карьера им. 50-летия Октября (Кузбасс). Средняя по объему скорость воздушного потока была определена по данным наблюдений в Коркинском карьере. Одновременно расчеты производились по формулам из [1]. Полученные материалы явились основой при разработке рекомендаций по вентиляции указанного карьера.

Результаты расчетов показали, что по сравнению с изотермическими условиями при инверсиях температуры с  $\gamma = -3^\circ\text{C}/100\text{ м}$  и среднегодовой скорости ветра на бровке карьера 3,2 м/с минимальное количество чистого воздуха, необходимое для разжижения вредных примесей до уровня ниже ПДК, увеличивается в 2,5 раза, а количество воздуха, поступающее на проветривание за счет естественных сил, уменьшается примерно в 3,3 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. М., Госгортехиздат, 1963, с. 49—89.
2. Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М.—Л., Госгорэнергоиздат, 1948, с. 30—31.
3. Воронцов П. А., Селицкая В. И., Честная И. И. Экспериментальная проверка теории плоско-параллельной струи в Коркинском карьере.—«Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 10—22.
4. Воронцов П. А. и др. Режим ветра и турбулентности атмосферы и их учет при оценке естественного проветривания глубоких карьеров.—«Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 11—25.
5. Вагер Б. Г. О возможности использования теории плоско-параллельной струи при исследовании ветрового режима в карьерах.—«Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 129—133.
6. Ахметов М. С., Щербак В. Н., Ванюшкин С. Е. Перспективная оценка энергии неустойчивости атмосферы Коркинского карьера.—«Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 156—163.
7. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973, с. 31—32.

## РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПОВЕРХНОСТЬЮ КАРЬЕРА

Появление карьера как углубления в земной поверхности ведет к существенному перераспределению условий теплообмена на разделе воздух—горные породы. Увеличение глубины открытых разработок характеризуется вскрытием более нагретых горных пород, а отмечаемое при этом приращение суммарной площади их обнажения способствует возрастанию общей теплоотдачи поверхностью карьера, что оказывает влияние на результирующее тепловое поле почвы и воздуха в карьере. Вместе с тем углубление горных работ ведет к значительному снижению скорости воздушных потоков в карьерном пространстве, что вызывает сокращение конвективной теплоотдачи с поверхности карьера. Изменение температурной стратификации в пределах карьерного пространства также определенным образом вносит свои коррективы в распределении теплового поля почвы и воздуха в карьере.

В данной работе рассматривается метод расчета суммарной теплоотдачи с поверхности карьера на различных стадиях его разработки.

В общем случае величина интенсивности теплоотдачи с поверхности пропорциональна ее площади ( $S$ ) и величине теплового потока ( $P$ ):

$$Q = PS. \quad (1)$$

При отсутствии карьера ( $z=0$ ) с эквивалентной площади ( $S_0$ ), соответствующей площади карьера в плане, теплоотдача равна

$$Q_0 = P_0 S_0. \quad (2)$$

Значение теплового потока  $P_0$  определяется выражением

$$P_0 = \lambda_0 \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_0 (t_{п0} - t_{в0}) = \alpha_0 \Delta t_0, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  — коэффициент теплообмена между поверхностью почвы и воздухом на уровне поверхности карьера;  $\lambda_0$  — коэффициент

теплопроводности поверхностного слоя почвы;  $t_{п0}$  и  $t_{в0}$  — соответственно температура поверхности почвы и воздуха для поверхностной площадки карьера.

Таким образом, при  $z=0$

$$Q_0 = \alpha_0 S_0 \Delta t_0. \quad (4)$$

С появлением карьера значения  $P$  и  $S$  изменяются. При этом бесконечно малое приращение тепловой энергии, теряемой горными породами, составляет

$$dQ_z = \left( S_z \frac{\partial P_z}{\partial z} + P_z \frac{\partial S_z}{\partial z} \right) dz. \quad (5)$$

Полагая, что для глубины  $z$  карьера

$$P_z = \alpha_z (t_{пz} - t_{вz}), \quad (6)$$

полное количество тепловой энергии, выделяемое карьером, для любой глубины его разработки  $H$  можно определить выражением

$$Q = Q_0 + \int_0^H \left( S_z \frac{\partial P_z}{\partial z} + P_z \frac{\partial S_z}{\partial z} \right) dz. \quad (7)$$

В условиях карьерного пространства значения  $\alpha_z$ ,  $t_{пz}$  и  $t_{вz}$  будут изменяться по глубине. При этом коэффициент теплообмена  $\alpha_z$  является сложной функцией, характеризующей суммарный эффект, отражающий влияние совокупности всего комплекса тепло-массообменных процессов [1]. Для условий теплообмена горных пород с окружающим воздухом значения  $\alpha_z$  изменяются также в зависимости от продолжительности контакта с воздухом, т. е. со времени начала обнажения горных пород. В таких условиях для процессов теплообмена в шахтах и рудниках О. А. Кремнев [2] ввел понятие коэффициента нестационарного теплообмена, для определения числовых значений которого разработаны критериальные графики или таблицы. Однако в пределах открытого карьерного пространства площади свежееобнаженных горных пород сравнительно малы по сравнению с общей поверхностью карьера и, как показали проведенные исследования [3], не оказывают заметного влияния на конвективный воздухообмен в карьере. Поэтому для оценки процессов теплообмена горных пород карьера и воздуха в нем будем считать приближенно, что значения коэффициента теплообмена зависят только от скорости ветра.

Производственные исследования и результаты моделирования [4] показывают, что скорость ветра в карьере снижается с глубиной. Принимая линейное изменение скорости ветра и коэффициента теплообмена по глубине карьера, получим

$$\alpha_z = \alpha_0 (1 - Az), \quad (8)$$

где  $A$  — коэффициент.

Изменение температуры поверхности почвы ( $t_{пз}$ ) и воздуха ( $t_{вз}$ ) определяем по уравнениям

$$t_{пз} = t_{п0} + \gamma_{п} z \quad (9)$$

и

$$t_{вз} = t_{в0} + \gamma_{в} z, \quad (10)$$

где  $\gamma_{п} = \partial t_{п} / \partial z$  и  $\gamma_{в} = \partial t_{в} / \partial z$  — соответственно значения температурных градиентов поверхности почвы и воздуха в карьерном пространстве.

Уравнение (6) с учетом (8) — (10) принимает вид

$$P_z = \alpha_0(1 - Az)[(t_{п0} - t_{в0}) + (\gamma_{п} - \gamma_{в})z] = \alpha_0(1 - Az)(\Delta t_0 + \Delta \gamma z), \quad (11)$$

где  $\Delta \gamma = \gamma_{п} - \gamma_{в}$  — разность температурных градиентов поверхности почвы и воздуха в карьере.

Дифференцируя (11) по  $z$ , получим

$$\frac{\partial P_z}{\partial z} = \alpha_0[(1 - Az) \Delta \gamma - A(\Delta t_0 + \Delta \gamma z)] = \alpha_0(\Delta \gamma - A \Delta t_0 - 2A \Delta \gamma z). \quad (12)$$

В работе [5] показано, что полная поверхность карьера

$$S_z = S_0 \left( 1 + a \frac{z}{L} + b \frac{z^2}{L^2} \right), \quad (13)$$

где  $L$  — средний размер карьера по поверхности.

Из уравнения (13) имеем

$$\frac{\partial S_z}{\partial z} = S_0 \left( \frac{a}{L} + \frac{2b}{L^2} z \right). \quad (14)$$

Подставляя (11) — (14) в уравнение (7), получим

$$Q = Q_0 + \int_0^H \left[ S_0 \left( 1 + a \frac{z}{L} + b \frac{z^2}{L^2} \right) \alpha_0 (\Delta \gamma - A \Delta t_0 - 2A \Delta \gamma z) + \alpha_0 (1 - Az) (\Delta t_0 + \Delta \gamma z) S_0 \left( \frac{a}{L} + \frac{2b}{L^2} z \right) \right] dz. \quad (15)$$

Представив подынтегральное выражение по степеням  $z$ , приведя подобные члены и интегрируя в заданных пределах по  $z$  от 0 до  $H$ , получим

$$Q = Q_0 + \alpha_0 S_0 \left\{ \Delta \gamma H - \Delta t_0 \left( AH - a \frac{H}{L} \right) + \Delta \gamma H \left( a \frac{H}{L} - AH \right) - \Delta t_0 \left( aAH \frac{H}{L} - b \frac{H^2}{L^2} \right) + \Delta \gamma H \left( b \frac{H^2}{L^2} - aAH \frac{H}{L} \right) - AHb \Delta t_0 \frac{H^2}{L^2} - AHb \Delta \gamma H \frac{H^2}{L^2} \right\}. \quad (16)$$

С учетом выражений (4) и (16) составим отношение

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} - AH + ap + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} (ap - AH) - (aAHp - bp^2) + \\ + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} (bp^2 - aAHp) - AHbp^2 - AHp^2 \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} p^2, \quad (17)$$

где  $p = H/L$  параметр безразмерной глубины карьера.

Записывая выражение (17) по степеням  $p$ , получим

$$\frac{Q}{Q_0} = (1 - AH) \left( 1 + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} \right) (1 + ap + bp^2) = \kappa_0 \sigma_0 \omega_0, \quad (18)$$

где

$$\kappa_0 = 1 - AH; \quad \sigma_0 = 1 + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0}; \quad \omega_0 = 1 + ap + bp^2.$$

Анализируя полученное выражение, видим, что искомое отношение  $Q/Q_0$  представляет собой произведение трех переменных. Первый сомножитель ( $\kappa_0$ ) учитывает степень затухания скорости поверхностных воздушных потоков в карьере, будем называть его динамическим фактором. Второй сомножитель ( $\sigma_0$ ) учитывает степень изменения температурного напора на разделе почва — воздух в карьере по отношению к температурному напору на поверхностной площадке карьера, назовем его температурным фактором. Третий сомножитель ( $\omega_0$ ), как показано в работе [5], представляет собой отношение полной поверхности карьера относительной глубины  $p$  к площади карьера в плане, будем считать его условно геометрическим фактором.

Таким образом, относительное количество тепловой энергии, теряемой карьером в процессе конвективной теплоотдачи, определяется совместным воздействием динамического, термического и геометрического факторов. Влияние геометрического фактора проявляется в возрастании с глубиной общей поверхности карьерного пространства [5]. В области наиболее реальных  $p < 1$  значения  $\omega_0 \geq 1$ . Динамический фактор  $\kappa_0$  характеризует снижение скорости ветра на глубине  $H$  карьера и изменяется в пределах  $0 < \kappa_0 \leq 1$ . Предельному значению  $\kappa_0 = 1$  соответствует  $H = 0$ , т. е. карьер с нулевой глубиной, в котором затухание воздушных потоков отсутствует. Нижний предел  $\kappa_0 \rightarrow 0$  определяется значениями относительной скорости в глубоком карьере  $\frac{u_k}{u_n} \rightarrow 0$ .

Величина температурного фактора

$$\sigma_0 = 1 + \frac{\Delta \gamma H}{\Delta t_0} = \frac{(t_{п0} + \gamma_n H) - (t_{в0} + \gamma_v H)}{t_{п0} - t_{в0}} \quad (19)$$

характеризует относительное приращение температурного напора на разделе почва — воздух по глубине карьера в долях температурного напора на поверхностной площадке карьера. На рис. 1 приведена номограмма для расчета числовых значений  $\sigma_0$  в области наиболее характерных изменений  $\Delta \gamma H$  и  $\Delta t_0$ . Как видно из

уравнения (19) и рис. 1, значения температурного фактора определяются отношением численных значений рассматриваемых разностей  $\Delta\gamma$  и  $\Delta t_0$ . При  $\Delta\gamma H = 0$   $\sigma_0 = 1$ , т. е. влияние температурного фактора не проявляется. Если  $\Delta\gamma$  и  $\Delta t_0$  имеют одинаковые знаки, то  $\sigma_0 > 1$ , т. е. в этом случае температурный фактор способствует суммарной теплоотдаче с поверхности карьера. При различном сочетании знаков рассматриваемых разностей  $\sigma_0 < 1$ , т. е. за счет температурного фактора

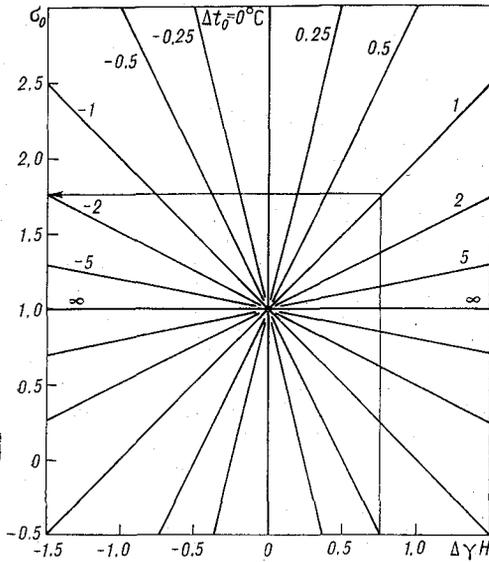


Рис. 1. Номограмма для определения температурного фактора  $\sigma_0 = 1 + \frac{\Delta\gamma H}{\Delta t_0}$ .

имеет место снижение общей теплоотдачи поверхностью карьера и  $Q < Q_0$ . При условии  $\Delta\gamma H / \Delta t_0 = -1$  величина  $\sigma_0 = 0$  и, как следует из уравнения (18), в этом случае  $Q = 0$ , т. е. поверхность карьера находится в состоянии термодинамического равновесия с его атмосферой и не излучает тепловой энергии. Если  $\frac{\Delta\gamma H}{\Delta t_0} < -1$ , то  $\sigma < 0$

и  $Q < 0$ , т. е. при этом карьер как термодинамическая система переходит в режим поглощения тепловой энергии из воздуха. Предельный случай  $\Delta t_0 = 0$  дает значения  $\sigma_0 \rightarrow \infty$ . Из уравнения (4) следует, что при этом  $Q_0 = 0$ , а поэтому и отношение  $Q/Q_0 \rightarrow \infty$ .

Рассмотрим далее характер изменения  $Q/Q_0$  для различных стадий отработки карьера. Для этого в уравнении (18) сделаем замену переменной  $H = Lp$ , тогда получим

$$\frac{Q}{Q_0} = (1 - ALp) \left( 1 + \frac{\Delta\gamma Lp}{\Delta t_0} \right) (1 + ap + bp^2). \quad (20)$$

Обозначая параметры  $AL = \kappa$ ,  $\frac{\Delta\gamma L}{\Delta t_0} = \sigma$  и записывая уравнение (20) по степеням  $p$ , имеем

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4, \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= a + \sigma - \kappa; & a_2 &= a(\sigma - \kappa) - \kappa\sigma + b; \\ a_3 &= b(\sigma - \kappa) - a\kappa\sigma; & a_4 &= -b\kappa\sigma. \end{aligned}$$

Таким образом, отношение количеств тепла  $Q/Q_0$  в функции безразмерной глубины карьера  $p$  определяется полиномом четвер-

той степени. Рассмотрим в общем виде характер его изменения. Как видно из выражения (21), значению  $Q/Q_0=1$ , т. е. когда полная теплоотдача поверхностью карьера эквивалентна потере тепла только с площади карьера в плане, соответствует глубина  $p_1=0$ , а также еще три значения, определяемые корнями уравнения

$$a_1 + a_2 p + a_3 p^2 + a_4 p^3 = 0. \quad (22)$$

Решение кубического уравнения (22) возможно по формулам Кардано. При этом во всех случаях следует выбирать только те значения искомых корней, которые, во-первых, действительны и положительны и, во-вторых, находятся в области практически реальных значений  $p < 1$ . Так как решение кубического уравнения — довольно трудоемкая задача, то можно для исследования наличия положительных значений применить метод оценки корней алгебраического уравнения по его коэффициентам [6]. Анализируя уравнение (20) и учитывая, что при  $p < 1$   $\omega_0 \neq 0$ , получим  $Q/Q_0=0$  при  $p' = \frac{1}{x}$  или  $p'' = -\frac{1}{\sigma}$ , т. е. в этом случае карьер находится в состоянии термодинамического равновесия с окружающим воздухом. При  $p > p'$  или  $p > p''$  поверхность карьера становится теплопоглощающей.

Для условного карьера ( $L=500$  м,  $H=200$  м,  $a=2,35$ ,  $b=-2,75$ ) рассмотрим изменение  $Q/Q_0$  по предложенной методике. Принимаем значение  $x=1,5$ ; при этом  $A=3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup>, что соответствует  $u_{\kappa}/u_{\pi} \approx 1 - AH = 0,4$ . Для  $\sigma = \frac{\Delta \gamma L}{\Delta t_0} = 2,5$  значения коэффициентов уравнения (21):

$$\begin{aligned} a_1 &= a + \sigma - x = 2,35 + 2,5 - 1,5 = 3,35; \\ a_2 &= a(\sigma - x) - x\sigma + b = 2,35(2,5 - 1,5) - 1,5 \cdot 2,5 - 2,75 = -4,15; \\ a_3 &= b(\sigma - x) - a x \sigma = -2,75(2,5 - 1,5) - 2,35 \cdot 1,5 \cdot 2,5 = -11,55; \\ a_4 &= -b x \sigma = -(-2,75) 1,5 \cdot 2,5 = 10,3. \end{aligned}$$

Таким образом, исследуемое уравнение имеет вид

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + 3,35p - 4,15p^2 - 11,55p^3 + 10,3p^4. \quad (23)$$

Определим его экстремальные значения. Дифференцируя (23) по  $p$ , получим

$$\frac{\partial(Q/Q_0)}{\partial p} = 3,35 - 8,3p - 34,65p^2 + 41,2p^3. \quad (24)$$

Приравнивая правую часть (24) к нулю и решая его по формулам Кардано, определяем три корня:  $p_1=0,963$ ;  $p_2=-0,368$ ;  $p_3=0,236$ . Так как максимальная глубина рассматриваемого карьера  $p_{\max}=H/L=0,4$ , то функция  $Q/Q_0$  на интервале  $(0 \div 0,4)p$  будет иметь экстремальное значение при  $p=0,236$ . Определим вид экст-

ремума. Дифференцируя вновь по  $p$  уравнение (24), определим знак выражения при  $p=0,236$ :

$$\frac{\partial^2(Q/Q_0)}{\partial p^2} = -8,3 - 69,3 \cdot 0,236 + 123,6 \cdot (0,236)^2 = -17,8 < 0,$$

т. е. функция  $Q/Q_0$  при  $p=0,236$  имеет максимум. Вычислим его значение:

$$\frac{Q}{Q_0} = 1 + 3,35 \cdot 0,236 - 4,15(0,236)^2 - 11,55(0,236)^3 + 10,3(0,236)^4 = 1,45,$$

т. е. рассматриваемый карьер при  $p=0,236$  со своей поверхности отдает тепловой энергии на 45% больше, чем его соответствующая поверхность в плане.

При  $p' = \frac{1}{\kappa}$  или  $p'' = -\frac{1}{\sigma}$  значение  $Q/Q_0 = 0$ . Так как в рассматриваемом случае  $p' = \frac{1}{1,5} = 0,667$  и  $p'' = -\frac{1}{2,5} = -0,4$ , что не соответствует рассматриваемому интервалу  $0 < p < 0,4$ , то можно сделать вывод, что при заданных параметрах поверхность карьера излучает тепловую энергию.

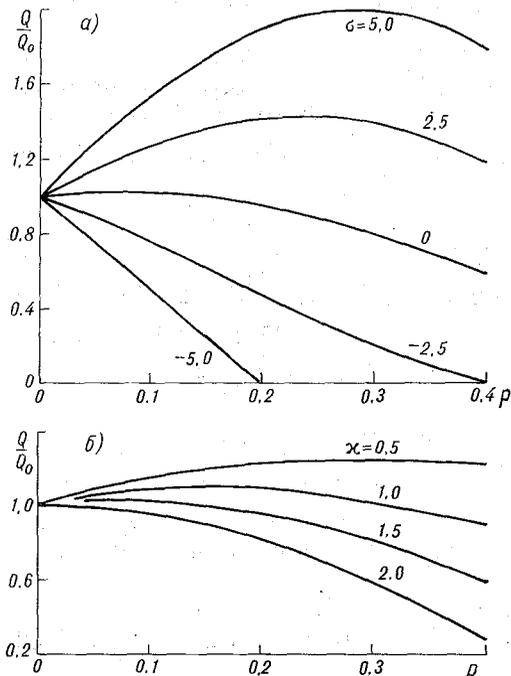


Рис. 2. Характер изменения теплоотдачи поверхностью карьера на различных этапах его разработки

а)  $\kappa=1,5$ ; б)  $\sigma=0$ .

Результаты расчетов по приведенной методике для рассматриваемого карьера при нескольких наиболее типичных значениях параметров  $\kappa$  и  $\sigma$  представлены в виде графиков (рис. 2). Из них видно, что при  $\kappa = \text{const}$  и  $\sigma > 0$  значения  $Q/Q_0 > 1$  и возрастают с увеличением глубины карьера, достигая максимума и снижаясь при дальнейшем углублении горных работ. При этом с возрастанием  $\sigma$  значения  $p_{\text{max}}$  также сдвигаются в сторону больших глубин. Для  $\sigma = 0$  отмечается весьма незначительное возрастание  $Q/Q_0$  при малых  $p$ , с максимумом, равным всего лишь 3% при  $p = 0,074$ , а затем снижение, и уже при  $p < 0,15$  значения  $Q/Q_0 < 1$ , т. е. суммарная теплоотдача поверхностью карьера в

этом случае меньше, чем площадью карьера в плане. Для  $\sigma < 0$  величина  $Q/Q_0 < 1$ , а при  $p = -\frac{1}{\sigma}$   $Q = 0$  т. е. поверхность карьера как теплофизическая система находится в условиях термодинамического равновесия с приземным слоем внутрикарьерной атмосферы. Если  $p > -\frac{1}{\sigma}$ , то  $Q < 0$ , т. е. в этом случае поверхность карьера поглощает тепловую энергию из воздуха карьерного пространства.

На рис. 2 б представлены кривые изменения  $Q/Q_0$  в зависимости от относительной глубины карьера при  $\sigma = 0$ . Из рисунка видно, что увеличение параметра  $x$  ведет к снижению теплоотдачи поверхностью карьера.

Таким образом, проведенный анализ показал, что величина суммарной теплоотдачи поверхностью карьерного пространства определяется совместным воздействием динамического, температурного и геометрического факторов.

Влияние геометрического фактора проявляется в возрастании с глубиной общей поверхности карьера, что способствует увеличению суммарной теплоотдачи.

Воздействие динамического фактора осуществляется через снижение скорости ветровых потоков в карьере, что ведет к уменьшению коэффициента теплообмена между горными породами и воздухом, а тем самым снижает и теплоотдачу горных пород.

Влияние температурного фактора, зависящего от соотношения величины температурных напоров на поверхностной площадке и в карьере, определяет как величину теплоотдачи, так и ее направление. Если знаки температурных напоров одинаковы, то поверхность карьера отдает тепловую энергию. При нулевом значении отношения температурных напоров карьер находится в состоянии термодинамического равновесия с его атмосферой. Если отношение температурных напоров отрицательно, поверхность карьера как термодинамическая система поглощает тепловую энергию из воздуха приземного слоя атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М., «Высшая школа», 1973. 296 с.
2. Кремнев О. А. Теоретические и экспериментальные основы теплового расчета глубоких шахт и установок для охлаждения рудничного воздуха.— Автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Л., ЛГИ, 1960. 38 с.
3. Фатуев Н. Г. и др. Тепловой фактор в карьерах.— «Сб. научн. тр. НИИОГР», 1965, вып. 4, с. 129—133.
4. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973. 184 с.
5. Иванов И. И. К вопросу о расчете площадей основных элементов карьерного пространства.— В кн.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеоздат, 1974, с. 119—126.
6. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М., Физматгиз, 1962. 356 с.

## ОБ ЭФФЕКТЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВОЗДУХООБМЕНА В КАРЬЕРЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ РАБОТАЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ

При проведении лазерного зондирования атмосферы карьера Центральный Ждановского рудника в течение зимы 1973-74 г. при отдельных метеорологических ситуациях было зарегистрировано периодическое (с интервалом 18—22 мин) вздутие и разрушение границы инверсионного слоя над карьерным пространством с последующим ее восстановлением в прежней горизонтальной плоскости. Эффект регистрировался визуально и в ночное время, когда границы инверсионного слоя отчетливо наблюдались при свете прожекторов вследствие интенсивного загрязнения области ниже ее по сравнению с вышерасположенной.

Деформация и разрушение инверсионной границы сопровождалась резким увеличением видимости в карьере, что дало основание судить о явлении нестационарного воздухообмена в карьере в виде периодических выбросов громадных объемов внутрикарьерной среды. Действительно, инструментальные замеры показали, что указанное явление сопровождается пульсацией температуры, давления и концентрации примесей вблизи дна карьера.

Все это позволило выдвинуть предположение о том, что причина явления заключается в тепловыделении внутрикарьерными механизмами (буровыми станками, экскаваторами и автосамосвалами).

При определении тепловыделения использовалась методика Ю. Д. Дядькина. Расчет тепла ( $Q_3$  ккал/ч), выделяемого экскаваторами, производился по формуле

$$Q_3 = 860K_3N - 2,34GH_r,$$

где  $K_3$  — коэффициент использования оборудования;  $N$  — мощность электропривода, кВт;  $G$  — производительность, т/ч;  $H_r$  — высота погрузки, м.

В свою очередь

$$G = \frac{60Ek}{t},$$

где  $E$  — емкость ковша экскаватора,  $m^3$ ;  $t$  — время рабочего цикла, мин;  $k$  — коэффициент разрыхления.

В карьере заняты различные экскаваторы, мощность и количество которых показаны в табл. 1. Проведенный расчет показал, что количество тепла  $\Sigma Q_0$ , выделяемого ими, равно 7 225 900 ккал/ч или 8 402 кВт.

Расчет тепла, выделяемого буровыми станками, производился по формуле

$$Q_{б.с} = 860K'_3N' - \Delta P,$$

где  $K'_3$  — коэффициент загрузки,  $N'$  — мощность привода станка, кВт,  $\Delta P$  — показатель полезной работы станка (около 30%).

Мощность и количество буровых станков, используемых в карьере, представлены в табл. 2. Расчет показал, что тепловыделение буровых станков  $\Sigma Q_{б.с}$  составляет 1 436 000 ккал/ч или 1 670 кВт.

В карьере работают также большегрузные автосамосвалы БелАЗ-540 и БелАЗ-548. По статистическим данным, в период рабочей смены в карьере одновременно находится около 20 автосамосвалов.

Расчет тепла, выделяемого автосамосвалами, производился по формуле

$$Q_a = G_d g - \Delta P = (1 - \Sigma \eta) G_d g,$$

где  $g$  — теплота сгорания топлива, ккал/ч;  $G_d$  — средний расход дизельного топлива с учетом коэффициента загрузки, кг/ч;  $\Delta P$  — полезная работа, ккал/ч;  $\Sigma \eta$  — суммарный к.п.д. (около 0,5).

Согласно расчетам, тепловыделение автосамосвалов в карьере  $\Sigma Q_a$  приблизительно равно 8 000 000 ккал/ч или 9304 кВт.

В результате получено весьма значительное суммарное тепловыделение всех механизмов:

$$Q_0 = 16\,661\,900 \text{ ккал/ч} = 19\,376 \text{ кВт.}$$

Поскольку в карьере некоторые источники тепловыделений являются подвижными, интенсивного конвективного движения под

Таблица 1

Тип экскаватора	Мощность, кВт	Количество
ЭКГ=4	332	5
ЭКГ=4,6	342	7
ЭКГ=8	688	10
ЭКГ=8и	658	10
ЭКГ=12,5	1000	1

Таблица 2

Тип станка	Мощность, кВт	Количество
БАШ=320	630	3
СБШ=320	630	1
БАШ=250	320	7

влиянием каждого из них не возникает. Их тепло диффундирует в атмосферу, а при наличии инверсионной «крышки» и при умеренной потере тепла в почву происходит его аккумуляция в карьерном пространстве до определенного момента, когда уровень подъемной силы нагреваемого воздуха превысит сопротивление инверсионной границы и сил атмосферного давления.

В заключение необходимо отметить, что рассмотренный эффект воздухообмена характерен лишь для отдельных метеорологических условий, в частности, для тех, когда потеря тепла карьерным пространством за счет эффективного излучения значительно ниже, чем его генерация работающими механизмами.

С. И. ЗЕНОВ

## К ВОПРОСУ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА НАКОПЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ КАРЬЕРОВ С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ АНАЛОГОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Прогноз загазования атмосферы карьера вредными примесями является одной из наиболее актуальных задач, связанной с проблемой оздоровления условий труда на открытых горных работах. Этот вопрос получил свое развитие в основном в последнее время, что связано также с поисками наилучшей организации работы средств искусственной вентиляции.

В настоящее время прогнозирование санитарно-гигиенической обстановки в карьере осуществляется по следующим основным направлениям:

— перспективный прогноз санитарно-гигиенической обстановки на рабочих местах в карьере, основанный на расчете естественного воздухообмена [1];

— перспективный прогноз накопления вредных газов в карьере на основе воздушного моделирования [2];

— оперативный прогноз нарушения воздухообмена и связанного с ним накопления вредных газов в атмосфере карьера, получаемый с помощью специально разработанной вероятностной модели [3, 4].

Однако такое прогнозирование не несет в себе достаточной информации, позволяющей правильно организовать работу средств пылегазоподавления, поскольку не учитывает динамику изменения параметров естественного проветривания и интенсивность выделения вредных примесей в атмосферу карьера. Прогноз по вероятностной модели также является в большей степени предварительным, так как по сути отвечает на вопрос «да» или «нет», оставляя открытым вопрос о продолжительности и мощности загазования атмосферы карьера.

Одним из путей решения задачи оперативного прогноза накопления вредных примесей в карьере является применение теории распространения примесей в атмосфере с заданными характеристиками турбулентности, уже нашедшей широкое распростра-

нение в практике расчетов рассеяния вредных примесей от точечных источников [5]. В этом случае решение уравнения турбулентного переноса в условиях конкретной или вероятной метеобстановки в карьере может служить основанием для прогноза санитарно-гигиенической обстановки на рабочих местах в карьере и явиться основной предпосылкой рациональной организации работы средств искусственного проветривания.

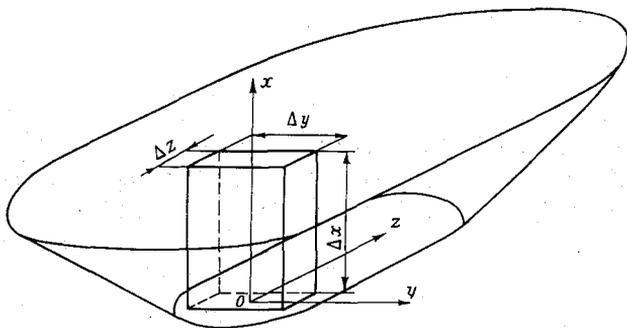


Рис. 1. Элементарный столбик карьерного пространства.

Для элементарного объема карьерного пространства, имеющего систему координат, расположенную так, как показано на рис. 1, условия турбулентного переноса будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(v^x c)}{\partial x} + \frac{\partial(v^y c)}{\partial y} + \frac{\partial(v^z c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(x, y, z, t); \\ \frac{\partial v^x}{\partial x} + \frac{\partial v^y}{\partial y} + \frac{\partial v^z}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В частном случае, когда  $v^x = v^y = v^z = 0$ , уравнения (1) принимают более простой вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(x, y, z) \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $c$  — текущая концентрация вредной примеси в атмосфере карьера;  $x, y, z$  — пространственные переменные;  $t$  — время;  $Q(x, y, z, t)$  — мощность источника (поток выделяющейся примеси);  $v^x, v^y, v^z$  — составляющие скорости ветра в карьере;  $K_x, K_y,$

$K_z$  — коэффициенты турбулентной диффузии; в общем случае являются функциями координат и времени.

Граничные условия удобно представлять в виде

$$\begin{aligned}x = 0 & \quad c = c_{\text{ист}}, \\x = H & \quad c = 0,\end{aligned} \quad (3)$$

$c_{\text{ист}}$  — концентрация вредной примеси, которая образуется в результате действия источника ее выделения. Второе граничное условие не является строгим, но в определенной степени оно удобно для выполнения вычислительных операций. Ненулевое значение концентрации на поверхности обусловлено наличием внешних источников выделения вредной примеси.

Начальные условия

$$\begin{aligned}t = 0 & \quad c = c_0, \\Q = (x, y, z, t) & = Q(x, y, z, 0).\end{aligned} \quad (4)$$

Решение уравнений (1) с граничными и начальными условиями (3) и (4) обычно осуществляется с помощью цифровых электронно-вычислительных машин. Однако по ряду причин, о которых будет сказано несколько ниже, применение точных ЭЦВМ для оперативного вычисления концентрации газов в карьере не может быть оправдано. Для этой цели более правильно использование электронных моделей, имеющих к тому же большую скорость быстрого действия, чем ЭЦВМ.

В частности, И. М. Витенбергом и Р. Л. Танкелевичем [6], Телдеслеем [7], и другими исследователями проводился сравнительный анализ применения ЭЦВМ и АВМ при решении задач, описываемых уравнениями в частных производных. Результаты анализа показывают, что в некоторых случаях, в частности при предварительном расчете рассеяния примесей в атмосфере, оказывается более целесообразным применение АВМ.

В нашем случае имеют место свои особенности, такие, как необходимость снижения ранга дробления и учета минимального количества точек, в которых определяются значения коэффициентов турбулентной диффузии (увеличение ранга дробления пространства резко увеличивает число узловых точек, в которых необходимо проводить измерение коэффициента), значительная погрешность определения коэффициента турбулентной диффузии в карьере и его изменения в пределах карьерного пространства.

Наличие у АВМ таких недостатков, как отсутствие памяти и малая точность решения, также не дают возможности применять универсальные АВМ для целей прогноза.

Наилучшим образом эту задачу может решать комбинированная аналого-цифровая модель, включающая аналоговый вычислитель и цифровую управляющую часть, которая осуществляет за-

доминанте и обработке полученных результатов, ввод начальных и граничных условий, изменение коэффициентов передачи.

Анализ методов решения предложенной задачи показал целесообразность применения метода частичного моделирования, который заключается в последовательном просчитывании каждого элемента пространства и склеивании полученных результатов. Этот метод аналогичен методу поточечного просчета, но фактически заменяет точку линий.

Прогноз в нашем случае — результат вычисленных значений концентраций вредных примесей в заданной точке атмосферы карьера на некоторый заданный промежуток времени или время, за которое концентрация вредной примеси в заданной точке карьера превысит предельно допустимый уровень.

Основными исходными предпосылками для прогноза накопления вредных газов в атмосфере карьера являются данные краткосрочного метеорологического прогноза, служащие для определения фактического значения и возможного хода изменения коэффициента турбулентной диффузии на заданный промежуток времени и порядок расстановки, а также режим работы технологического оборудования в карьере.

Схема оперативного прогноза накопления вредных газов в атмосфере карьера такова:

— краткосрочный синоптический прогноз, который учитывает вероятностный ход основных метеоэлементов, влияющих на естественный воздухообмен в карьере;

— привязка данных синоптического прогноза к конкретным значениям метеоэлементов, замеренным на карьерной метеостанции. Определение коэффициентов турбулентной диффузии в узловых точках и вероятностного хода их изменения на заданный промежуток времени;

— измерение концентраций вредных примесей в карьере, уже накопленных на начало отсчета;

— ввод в вычислительную машину значений коэффициентов турбулентной диффузии, хода их изменения, начальных и граничных условий и производство вычислений;

— обработка полученных данных с выдачей операторам вентиляционных установок указаний о порядке и режиме их работы.

Несмотря на наличие большого числа методов определения коэффициентов турбулентной диффузии, в частности и для точек, расположенных достаточно высоко [8], особенности движения воздуха в карьере пока не позволяют принять ту или иную формулу для определения коэффициента и его распределения по пространственным координатам. Вероятно, для подбора приемлемой зависимости необходимо будет провести в будущем исследование сходности различных методов, аналогично тому, как это было проведено Г. П. Расторгуевой [9].

По всей вероятности, значение коэффициента турбулентной диффузии в карьере надо будет искать как функцию пульсации скоростей ветра и градиентов температуры по соответствующим

направлениям. Заметим, что при штиле перемещение газового облака в карьере будет полностью определяться термическим режимом карьера и стратификацией на поверхности, что нашло свое отражение в работе И. И. Иванова [10].

Рассмотрим аналоговый принцип решения уравнения (1), для чего представим его в конечно-разностной форме, считая, что коэффициенты турбулентной диффузии не зависят от координат в пределах отрезков дробления. Разобьем выделенный нами ранее столбик на  $n$  частей по высоте, тогда уравнение (1) перейдет в следующую систему конечно-разностных линейных однородных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dc_{i,j,k}}{dt} = & \frac{K_x}{(\Delta x)^2} (c_{i-1,j,k} - 2c_{i,j,k} + c_{i+1,j,k}) + \\ & + \frac{K_y}{(\Delta y)^2} (c_{i,j-1,k} - 2c_{i,j,k} + c_{i,j+1,k}) + \\ & + \frac{K_z}{(\Delta z)^2} (c_{i,j,k-1} - 2c_{i,j,k} + c_{i,j,k+1}) + \\ & + \frac{c_{i,j,k}}{2} \left[ \frac{v_{i+1,j,k}^x - v_{i-1,j,k}^x}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^y - v_{i,j-1,k}^y}{\Delta y} + \right. \\ & \left. + \frac{v_{i,j,k+1}^z - v_{i,j,k-1}^z}{\Delta z} \right] + \frac{v_{i,j,k}^x (c_{i+1,j,k} - c_{i-1,j,k})}{2\Delta x} + \\ & + \frac{v_{i,j,k}^y (c_{i,j+1,k} - c_{i,j-1,k})}{2\Delta y} + \frac{v_{i,j,k}^z (c_{i,j,k+1} - c_{i,j,k-1})}{2\Delta z} + Q(x,t); \\ \frac{v_{i+1,j,k}^x - v_{i-1,j,k}^x}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^y - v_{i,j-1,k}^y}{2\Delta y} + \frac{v_{i,j,k+1}^z - v_{i,j,k-1}^z}{2\Delta z} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Сгруппируем подобные члены и получим

$$\begin{aligned} \frac{dc_{i,j,k}}{dt} = & c_{i-1,j,k} \left( \frac{K_x}{(\Delta x)^2} - \frac{v_{i,j,k}^x}{2\Delta x} \right) + c_{i,j-1,k} \left( \frac{K_y}{(\Delta y)^2} - \frac{v_{i,j,k}^y}{2\Delta y} \right) + \\ & + c_{i,j,k-1} \left( \frac{K_z}{(\Delta z)^2} - \frac{v_{i,j,k}^z}{2\Delta z} \right) - c_{i,j,k} \left( \frac{2K_x}{(\Delta x)^2} + \frac{2K_y}{(\Delta y)^2} + \frac{2K_z}{(\Delta z)^2} \right) + \\ & + c_{i+1,j,k} \left( \frac{K_x}{(\Delta x)^2} + \frac{v_{i,j,k}^x}{2\Delta x} \right) + c_{i,j+1,k} \left( \frac{K_y}{(\Delta y)^2} + \frac{v_{i,j,k}^y}{2\Delta y} \right) + \\ & + c_{i,j,k+1} \left( \frac{K_z}{(\Delta z)^2} + \frac{v_{i,j,k}^z}{2\Delta z} \right) + Q(x,t), \\ \frac{v_{i+1,j,k}^x - v_{i-1,j,k}^x}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^y - v_{i,j-1,k}^y}{2\Delta y} + \frac{v_{i,j,k+1}^z - v_{i,j,k-1}^z}{2\Delta z} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $v_{i,j,k}^x$ ,  $v_{i,j,k}^y$ ,  $v_{i,j,k}^z$  — проекции вектора скорости ветра в точке  $i, j, k$  на оси координат.

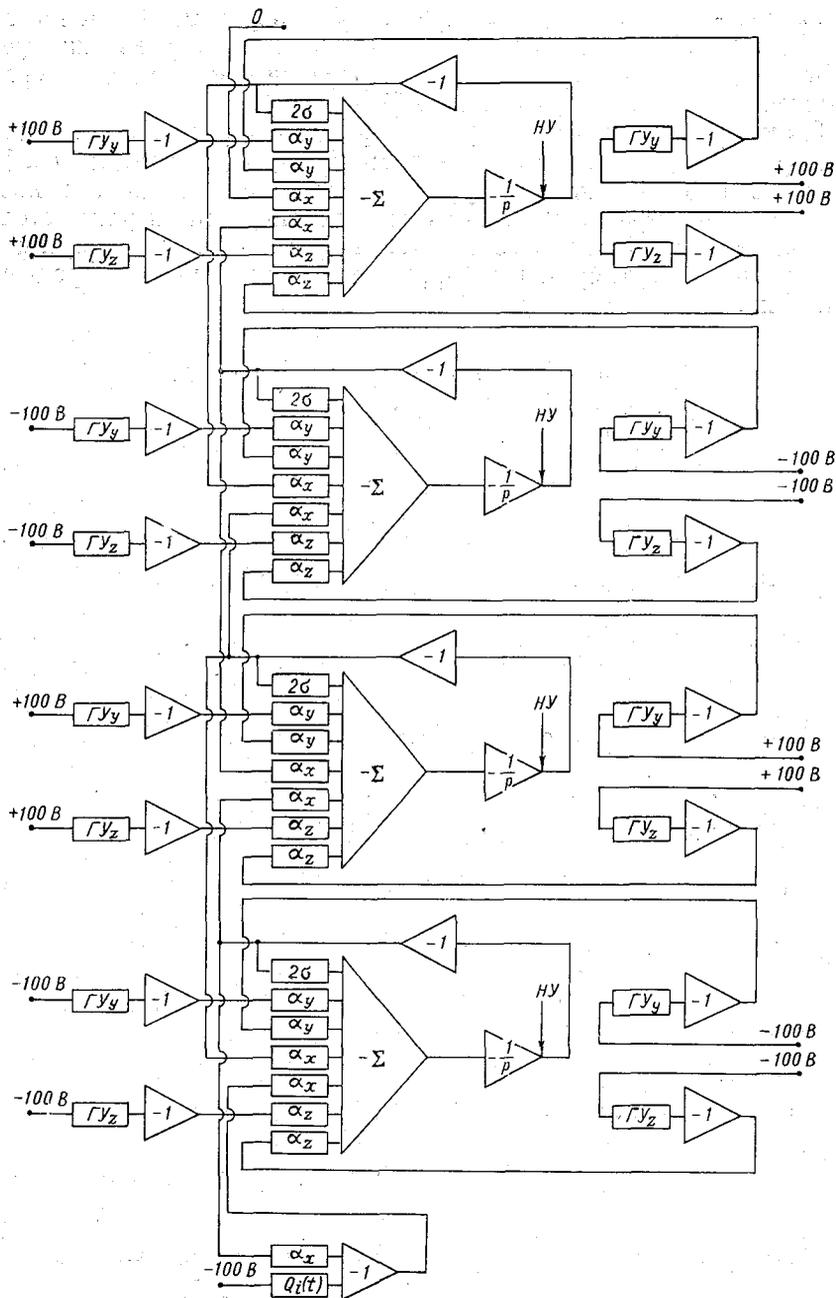


Рис. 2. Блок-схема аналогового вычислительного элемента для расчета концентраций в карьере ( $n=5$ ).  
 $\sigma = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$ .

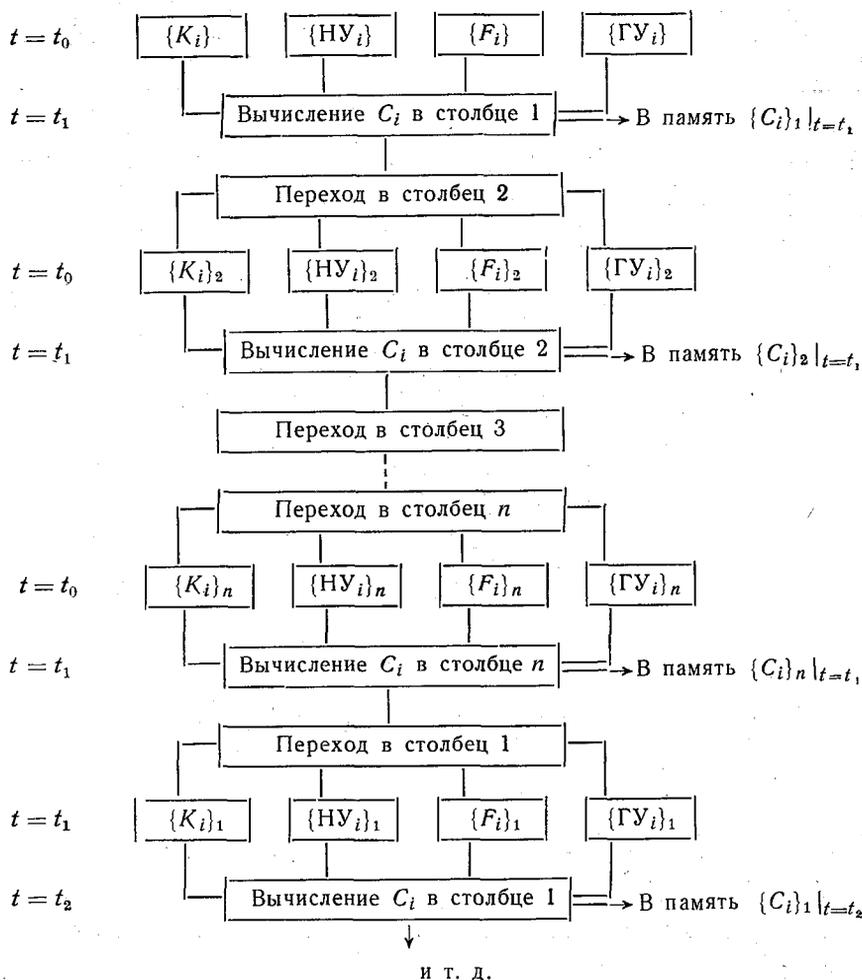


Рис. 3. Тактограмма работы аналого-цифрового вычислительного комплекса.

Система уравнений (6) может быть существенно упрощена, если окажется возможным пренебречь ветровым переносом. В частности, пример решения такой системы с максимально возможными упрощениями приведен в [11].

Члены, содержащие индексы  $j-1$ ,  $j+1$ ,  $k-1$ ,  $k+1$ , выступают как условия на боковых границах, а  $i=0$  и  $i=n$  — на торцах единичного столбца и определяются заранее.

Значение интенсивности выделения вредной примеси задается в виде граничной функции на дне столбца либо на некоторой высоте  $x$ , которая определяется как высота подъема нагретой струи примеси за счет конвекции.

Блоки ввода данных о работе  
и месте нахождения основных  
источников выделения примесей

Блоки ввода параметров турбу-  
лентности атмосферы карьера

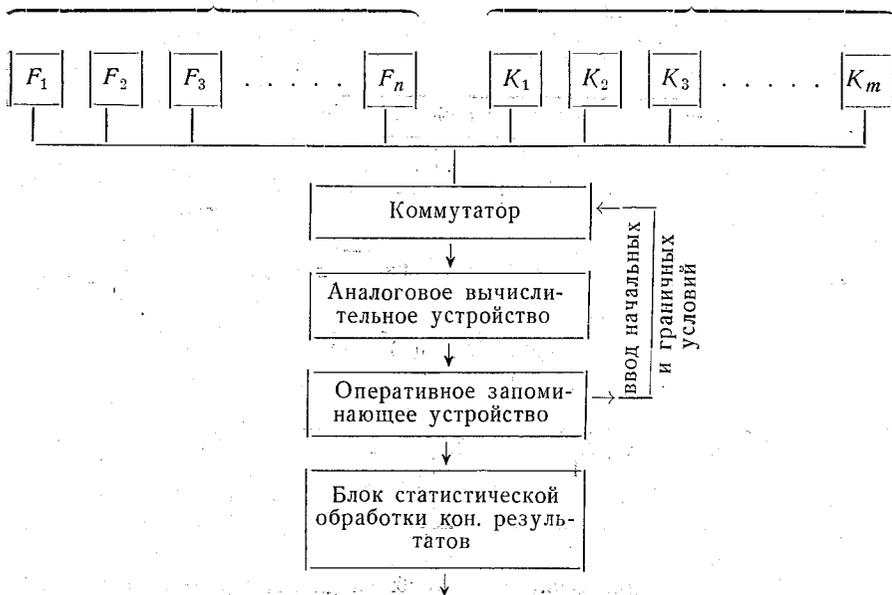


Рис. 4. Принципиальная блок-схема аналого-цифровой вычислительной машины для расчета концентраций вредных примесей в атмосфере карьера.

Блок-схема реализации системы уравнений (6) для случая  $n=5$  представлена на рис. 2.

Рассмотрим процесс вычисления концентраций выделяющихся в атмосферу карьера примесей с помощью метода частичного моделирования.

Разобьем рассматриваемый промежуток времени прогноза на несколько частей — тактов. Количество тактов не должно быть слишком большим, так как это вызовет увеличение времени вычисления (в каждом конкретном случае оно будет своим), однако выбор количества тактов не является определяющим в конечном решении и зависит от частоты пульсаций функций, моделирующих работу источников выделения вредной примеси. Величина такта должна быть меньше полупериода пульсаций функций  $Q(x, t)$ . Тактовые отрезки времени в общем случае неодинаковы.

Из всего набора элементарных столбиков, составляющих все пространство карьера, выбираем столбик № 1 и производим для него вычисление системы уравнений (6) в пределах такта (условия на боковых границах столбика нулевые). Затем переходим в столбик № 2, где также производим вычисление системы уравнений (6), но в качестве граничных условий со стороны столбца № 1

выступают концентрации, вычисленные нами в предыдущий раз. Также как и в первом столбце, начальные условия нулевые.

Все вычисленные значения концентраций запоминаются. Когда заканчивается вычисление в последнем столбце в пределах первого такта, делается переход в столбец № 1 и весь цикл вычислений производится в пределах второго такта. Отличием от первого такта является наличие ненулевых начальных и граничных условий в каждой точке соответствующего столбца. Весь цикл заканчивается расчетом концентрации в последнем столбце в пределах последнего такта. Тактограмма работы вычислительной машины представлена на рис. 3.

Принципиальная блок-схема специализированной вычислительной машины для оперативного прогноза накопления вредных примесей в карьере представлена на рис. 4.

На рис. 5 изображены поля концентраций в карьере Центральный месторождения Джанатас при линейном положении источников выделения вредных примесей и штиле, вычисленные на АВМ ЭМУ-10.

Как видно из представленного рисунка, устойчивому состоянию атмосферы соответствует повышенное содержание вредной примеси и через 1,5 ч карьер

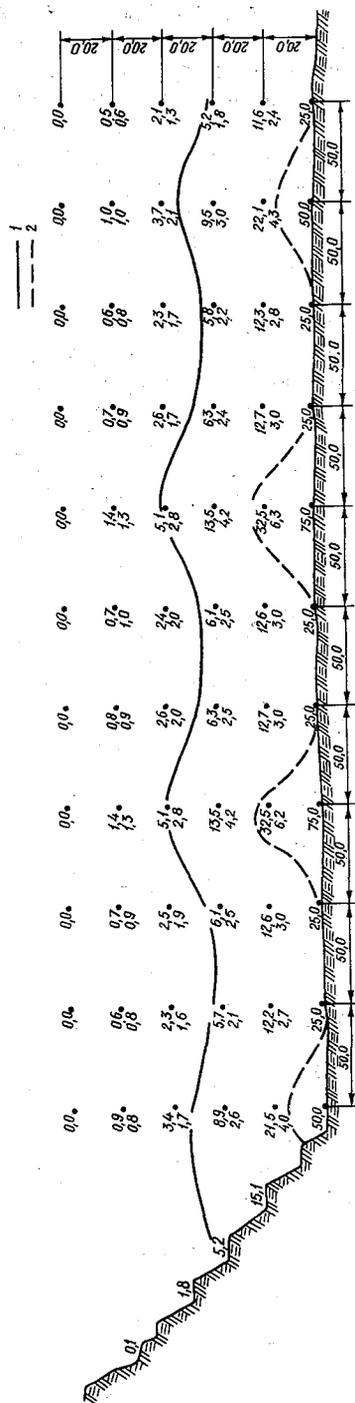


Рис. 5. Поля концентраций вредных примесей (%) в атмосфере карьера Центральный при устойчивом (1) и неустойчивом (2) состоянии атмосферы, вычисленные на АВМ ЭМУ-10.

Верхние значения относятся к случаям устойчивого состояния, нижние — к случаям неустойчивого состояния.

оказывается загазован до уровня, отмеченного сплошной линией. В случае неустойчивого состояния атмосферы загазованными оказываются лишь участки, в которых действует технологическое оборудование, постоянная накопления составляет 15 мин.

Если исходить из задачи, которую решает оперативный прогноз для организации работы средств искусственного проветривания и пылеподавления, то представленные результаты расчета показывают целесообразность использования средств общекарьерного проветривания в случае инверсии, а в случае неустойчивого состояния атмосферы — средств местного проветривания и пылеподавления.

Применение средств аналого-цифровой вычислительной техники в целях оперативного прогноза загазования атмосферы карьера даст возможность рационально и своевременно вводить в действие вентиляционную технику, не допустить общего загазования карьера, улучшить организацию работы вентиляционной службы, что в итоге окажет свое благотворное влияние на санитарно-гигиеническую обстановку на рабочих местах в карьерах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М. Атомиздат, 1973. 184 с.
2. Никитин В. С., Паршин П. Д. Прогнозирование состава общей атмосферы карьеров методом моделирования. — «Научные труды ин-тов охраны труда ВЦСПС», 1968, вып. 55, с. 3—8.
3. Силин Ф. М., Симakov П. Г. Прогнозирование времени загрязнения атмосферы Сибайского карьера. — «Горный журнал», 1970, № 12, с. 58—59.
4. Успен А. А. Методика прогноза загрязнения Асбестовского и Сибайского карьеров суточной заблаговременности. — Сб. работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 11, с. 71—73.
5. Берлянд М. Е., Оникул Р. И., Генрихович Е. Л. О расчете загрязнения атмосферы выбросами из дымовых труб электростанций. — «Тр. ГГО», 1974, вып. 158, с. 3—21.
6. Витенберг И. М., Танкелевич Р. Л. Аналоговые вычислительные машины с последовательным выполнением операций. М., «Энергия», 1968. 184 с.
7. Tyldesley I. B. The solution of atmospheric diffusion equations by electrical analog methods. — Meteorological office, Scientific paper, 1965, N 22, p. 34.
8. Ляпин Е. С. О турбулентном перемешивании воздуха в атмосфере. — «Метеорология и гидрология», 1948, № 5, с. 13—23.
9. Расторгуева Г. П. Характеристики метеорологического режима и турбулентного обмена в приземном слое по данным градиентных наблюдений. — «Тр. ГГО», 1965, вып. 172, с. 48—57.
10. Иванов И. И. Влияние геотермического режима и температурной стратификации в приземном слое атмосферы на тепловой режим в карьере. — См. настоящий сб.
11. Зенов С. И. Использование аналоговых вычислительных машин для изучения процессов рассеяния примесей в атмосфере карьеров. — «Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 69—74.

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В КАРЬЕРАХ

В практике проведения микроклиматических исследований в карьерах широко применяется комплекс измерительных приборов, выпускаемых промышленностью для метеорологической сети [1]. Для измерения ветровых характеристик, например, используются ручные чашечные анемометры МС-13, анеморумбографы М-12, метеорологические станции М-49 и другие. Измерения температуры и влажности воздуха в экспедициях производятся с помощью аспирационных психрометров, а в стационарных условиях — метеорологическими термометрами в психрометрической будке и различными самописцами (термографы М-16 и гигрографы М-21). Элементы составляющих солнечной радиации и теплового баланса также фиксируются с помощью серийных приборов (альбедометры АС-3×3 или АП-3×3, балансомеры М-10 в паре с гальванометрами ГСА-1, интеграторы электролитические Х-603 и т. п.).

Для характеристики воздухообмена в пределах карьера необходимо знать вертикальную структуру воздушных потоков и температурную стратификацию в нем [2]. Приборов же для таких измерений промышленность не выпускает, а выполнение подобных исследований с помощью имеющихся типовых образцов при размещении их каким-либо образом в необходимых точках карьерного пространства представляет собой весьма трудоемкую и во многих случаях технически невыполнимую задачу. Специфика открытых горных работ (применение мощной горнодобывающей техники, ежедневные массовые взрывы, повышенная запыленность и загазованность карьерного пространства, постоянное углубление карьера при большой подвижности общего фронта горных работ) предъявляют весьма жесткие требования к комплексу измерительных приборов. Наиболее рациональным в этом отношении является применение автоматических измерительных систем.

Для исследования вертикальной структуры воздушных потоков и температурной стратификации в карьерном пространстве и вне

его были разработаны и изготовлены полуавтоматические приборы: блок контактных анемометров (БКА) и термоградиентограф (ТГГ). Принципиальные схемы и подробное описание изготовленных приборов приведены в работах [3, 4].

БКА представляет собой систему объединенных датчиков скорости ветра, размещаемых на различных высотах. В качестве ветроприемников применены модернизированные датчики ветра контактного анемометра М-25, где червячная передача на контактную пару  $i=75$  заменена кулачковым механизмом с коэффициентом редукции  $i=1$ , что позволило значительно снизить момент трения, повысив тем самым начальную чувствительность датчика, а за счет снижения коэффициента редукции и соответствующего увеличения скважности измерительного сигнала поднять точность измерения скорости ветровых потоков. В качестве регистраторов БКА использовались электромагнитные счетчики импульсов СБ-1М/100, оформленные в виде отдельного пульта, через штепсельный разъем соединяющегося с датчиками. Питание БКА осуществлялось от отдельного выпрямителя на стационаре или от комплекта батарей.

ТГГ представляет собой приборную следящую систему, измеряющую разности температур между слоями воздуха и некоторым «опорным» слоем на высоте 2 м от поверхности почвы. Результаты измерения разности температур фиксируются на ленте электронного автоматического потенциометра ЭПП-09. В качестве чувствительных элементов датчиков ТГГ используются металлические термометры сопротивления (платиновые или медные). На различных этапах эксплуатации ТГГ применялись датчики с номинальным значением сопротивления (при  $t=0^{\circ}\text{C}$ ) 100, 250 или 300 Ом.

Чувствительные элементы размещались в специальных стаканах, которые обеспечивали радиационную и механическую защиту. С помощью крыльчатки, насаженной на вал маломощного двигателя ДП-1-13, обеспечивалась аспирация чувствительного элемента в шахте стакана датчика в пределах 3,0—3,5 м/с. Датчики соединялись с регистратором экранированным многожильным кабелем. Питание аспирационных двигателей осуществлялось от отдельного выпрямителя.

Созданные приборы термоветрового зондирования были установлены на экспериментальном участке карьера Аксай (Южный Казахстан). При этом регистраторы и источники питания (батареи или выпрямители) располагались в вагончике полевой лаборатории на борту карьера.

Для подъема группы датчиков БКА и ТГГ через экспериментальный участок карьера были переброшены два стальных троса диаметром 6 мм и длиной каждый около 300 м, укрепленные на поверхности на мачтах высотой по 20 м. Натяжение каждого несущего троса осуществлялось через неподвижный блок в верхней части мачты с помощью отдельной лебедки. На несущем тросе для ТГГ размещалась подвижная каретка, которая с помощью

двух направляющих роликов свободно перемещалась по основному несущему тросу. Вертикальный стальной трос диаметром 3 мм крепился к каретке, на нем монтировались датчики и передающий кабель. Корпуса датчиков ТГГ хомутиками крепились к тросу с помощью уголковых или трубчатых откосов длиной 0,5 м.

Для БКА была применена вертикальная подвеска. К несущему горизонтальному тросу крепились два стальных троса диаметром 3 мм, расположенные на расстоянии 0,55 м. На разных высотах к вертикальным тросам прикреплялись дюралевые уголки, по центру которых в отверстиях устанавливались металлические штыри диаметром 8 мм для размещения анемометрических вертушек. В нижней части штыри имели массивные металлические гайки-противовесы, с помощью которых датчики удерживались в вертикальном положении. Перемещение каретки по несущему тросу осуществлялось с помощью оттяжек из тонкого стального троса непосредственно с бортов в любую точку сечения карьера.

В качестве контролируемых высот в карьере, где размещались датчики ТГГ и БКА, были выбраны высоты 1, 2, 4, 8, 15, 20, 30, 40 и 50 м. Для сравнения полученных результатов термоветрового зондирования в карьере и на его поверхности аналогичные измерения проводились на мачте высотой 20 м на поверхности. Соответственно на высотах 1, 2, 4, 8, 15 и 20 м от поверхности почвы на кронштейнах длиной около 1 м устанавливались необходимые датчики.

Методика измерения температурных профилей в карьере с помощью ТГГ предусматривала предварительное включение прибора на прогрев. При этом двигатели аспирации не работают, а чувствительные элементы не питаются измерительным током, т. е. полностью исключается их нагрев. Далее включается выпрямитель питания аспирационных двигателей, а через 5 мин и термоградиентограф. Результаты измерений разности температур на заданных высотах 2—1, 2—4, 2—8, 2—15, 2—20, 2—30, 2—40, 2—50 м для карьера и 2—1, 2—4, 2—8, 2—15, 2—20 м для поверхности, с учетом знака, печатаются соответствующими самописцами ЭПП-09 на ленту. Измерительный цикл выбирается в пределах 5—10 мин, после чего выключаются измерительные мосты самописца и двигатели аспирации. На ленте дополнительно отмечаются необходимые для обработки данные: время измерения, температура опорного датчика (по сухому термометру контрольной психрометрической метеобудки, установленной вблизи опорного датчика) и другие наиболее характерные метеорологические явления (дождь, снег, облачность и т. п.).

Дальнейшая обработка результатов проведенного измерения разностей температуры воздушных слоев заключается в вычислении средних зафиксированных разностей  $\Delta t$  для каждой высоты. С учетом температуры опорного датчика  $t_{оп}$  по тарифовочным графикам или таблицам для величины  $\Delta t$  определяется температурная поправка  $\delta(\Delta t)$  на измеренную разность [3]. Окончатель-

ный результат измерения принимает вид  $\Delta t_{\text{испр}} = \Delta t + \delta(\Delta t)$ , который заносится соответственно для каждой высоты и измерительного пункта (карьер или поверхность) в рабочий журнал.

При ветровом зондировании с помощью БКА перед началом измерения в срочные часы записываются в регистрационный журнал начальные показания всех счетчиков, затем общим тумблером включается питание приборов и через 10 мин (отсчет времени производится строго по секундомеру) счетчики отключаются. Их показания опять регистрируются в журнале. Затем вычисляются разности конечных и начальных показаний каждого из счетчиков, т. е. определяется число „контактов“ за интервал осреднения и по рабочим графикам или аналогично составленным таблицам определяются значения скорости ветра на всех контролируемых высотах.

Все датчики БКА перед эксплуатацией тарируются в аэродинамической трубе. При этом обязательно проверяется «начальная чувствительность», т. е. тот минимальный уровень скорости  $u_0$  ветрового потока, с которого вертушка ветроприемника начинает вращаться, а также отмечается устойчивость показаний всего звена датчик — кабель — регистратор при варьировании скорости воздушного потока. По результатам проведенной проверки строятся тарировочные графики-паспорта в координатах скорость — число контактов за  $\Delta t = 10$  мин и вычисляется крутизна характеристики  $k$ , а также определяется начальная скорость  $u_0$ . Для упрощения обработки результатов ветрового зондирования при комплектовании БКА все датчики были выбраны практически с одинаковыми значениями  $k$  и  $u_0$  ( $u_0 = 0,5$  м/с,  $k = 3 \cdot 10^{-3}$  м/(с·импульс)). Это позволило всю получаемую на БКА информацию обрабатывать по единому графику.

Чувствительные элементы ТГГ тарировались в лабораторных условиях с применением водяного термостата, температура среды которого контролировалась с точностью  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  по контрольному ртутному термометру. По результатам тарировки строились графики изменения сопротивления в зависимости от температуры и вычислялись аналитически (методом наименьших квадратов) значение сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  ( $R_0$ ) и температурный коэффициент сопротивления ( $\alpha$ ).

Длительная эксплуатация БКА и ТГГ в производственных условиях экспериментального участка карьера Аксай (более 3 лет) показала, что приборы работают устойчиво и надежно, позволяя оперативно получать необходимую информацию о термоветровой структуре воздушного слоя как в самом карьере, так и в приземном слое в любое время суток и года. В случае обнаружения инверсионных ситуаций или иных интересных метеорологических явлений измерения проводились более часто, с интервалом 0,5—1 ч или же непрерывно, чтобы проследить динамику зарождения, развития и разрушения инверсионных явлений в карьерах. При проведении производственных экспериментов по естественному проветриванию в карьере термоградиентограф поз-

волял оперативно оценивать характер перестройки температурного профиля в период проветривания по результатам записей температурных разностей на ленте регистратора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева З. И., Битколов Н. З., Иванов И. И. Опыт эксплуатации комплекса измерительных приборов в условиях карьеров.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 117—123.
2. Битколов Н. З. Ветровая и температурная стратификация атмосферы в карьерах.— «Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», 1969, 5, с. 66—73.
3. Иванов И. И., Хирви В. А. Приборы вертикального зондирования атмосферы в карьерах.— «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 97—109.
4. Иванов И. И., Хирви В. А. Термоградиентограф для производственных наблюдений в карьерах.— «Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», 1971, № 5, с. 89—95.

П. В. БЕРЕСНЕВИЧ, Г. Я. НИКОЛИН, И. В. ФУРСА

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ СЕВЕРНОГО И НОВОКРИВОРОЖСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

В связи с углублением карьеров Криворожского бассейна до 200 м и более и интенсификацией их отработки возникла необходимость получения рекомендаций по прогнозу перспективы естественного их проветривания на ближайшие 10—12 лет. Так как в естественных условиях изучение схем проветривания затруднительно, а прогностические ситуации невозможны, был проведен комплекс лабораторных исследований в низкоскоростной аэродинамической трубе.

Карьер № 1 Новокриворожского горно-обогатительного комбината (НКГОКа) и карьер Первомайский Северного горно-обогатительного комбината (СевГОКа) были выбраны как наиболее типичные для Криворожского бассейна. Первый относится к труднопроветриваемым, а второй к хорошо проветриваемым карьерам. Модели карьеров выполнены в масштабе 1:1000 (№ 1— по состоянию горных работ на 1973 г.) и 1:2000 (Первомайский— на 1972 г. и момент отработки). Параметры карьеров и их моделей представлены в табл. 1.

Моделирование проводилось при соблюдении геометрического подобия в зоне автомодельности, которая наступает при равномерной скорости воздушного потока, равной 0,6—0,8 м/с. Работы проводились при скорости воздушного потока 0,8 м/с. Методика исследований аналогична методике ИГД МЧМ СССР [1].

В процессе исследований регистрировалось изменение концентрации дыма в различных точках карьера по всей его высоте с помощью системы датчиков, состоящих из миниатюрных лампочек и фотодиодов, и шлейфового осциллографа. Датчики и фотодиоды монтировались в теле модели без координатника. Дым, медленно рассеивающийся, получали путем смеси  $\text{CO}_2$  с табачным дымом.

Таблица 1

## Параметры карьеров и их моделей

Карьер	Длина (верх)	Шири- на (верх)	Глуби- на	Длина (нижняя отметка)	Ширина (нижняя отметка)
Первомайский (по состоянию на 1 I 1972 г.) . . . . .	$\frac{1400}{70}$	$\frac{1300}{65}$	$\frac{120}{6}$	$\frac{440}{22}$	$\frac{80}{4}$
Первомайский (на конец отработки)	$\frac{2500}{125}$	$\frac{1800}{90}$	$\frac{340}{17}$	$\frac{1800}{90}$	$\frac{1100}{55}$
№ 1 (по состоянию на 1 IV 1973 г.)	$\frac{1250}{125}$	$\frac{900}{90}$	$\frac{180}{18}$	$\frac{850}{85}$	$\frac{350}{35}$

Примечание. Числитель — размеры карьера в метрах, знаменатель — размеры модели в сантиметрах.

В процессе проведения исследований сравнивались варианты естественного и искусственного проветривания карьеров при взаимноперпендикулярных направлениях ветра, при различных расположениях отвалов и без них. Из уравнения, описывающего процесс проветривания карьера после разового загрязнения [2],

$$Q = \frac{V_k}{kt} \ln \frac{c_0}{c},$$

где  $Q$  — количество воздуха, удаляемое из карьера;  $V_k$  — объем

Таблица 2

## Сравнительная эффективность естественного проветривания карьера Первомайский (положение горных работ на 1972 г.)

Направление ветра	$kQ/V_k$					Эффективность проветривания, %
	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	среднее по направ- лениям	среднее по карьере	
<b>Карьер с отвалами</b>						
В	1,27	1,25	1,38	1,30	1,27	94
З	1,32	1,41	1,45	1,39		100
Ю	0,98	1,16	1,01	1,05		75
С	1,39	1,35	1,35	1,36		98
<b>Карьер без отвалов</b>						
В	1,6	1,55	1,67	1,61	1,46	100
З	1,52	1,18	1,5	1,4		87
Ю	1,45	1,08	1,32	1,28		80
С	1,53	1,58	1,56	1,56		97

карьерного пространства;  $k$  — коэффициент эффективности воздухообмена;  $t$  — время проветривания;  $c_0$  — начальная концентрация примеси;  $c$  — концентрация примеси в момент времени  $t$  после начала проветривания, определяется величина  $kQ/V_k$ , которая пропорциональна коэффициенту эффективности воздухообмена в карьерном пространстве ( $k$ ). При проведении исследований  $Q$  и  $V_k$  постоянны. Сравнивая  $kQ/V_k$ , вычисленные для различных вариантов проветривания, можно судить об их эффективности по отношению друг к другу.

Результаты исследований, проведенных на модели карьера Первомайский, показывают, что наиболее благоприятным направ-

Таблица 3

**Эффективность естественного проветривания карьера Первомайский (положение горных работ на период обработки без отвалов)**

Направление ветра	$kQ/V_k$					Эффективность проветривания, %
	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	среднее по направлениям	среднее по карьере	
В	0,76	1,27	0,82	0,95	0,93	90
З	0,84	0,865	1,17	0,96		91
Ю	0,87	1,15	1,16	1,06		100
С	0,73	0,76	0,72	0,74		70

лением ветра для карьера с отвалами является западное, а наиболее неблагоприятным — южное (табл. 2). В таблице эффективность естественного проветривания при западном направлении принята за 100%, а эффективность при остальных пересчитана соответственно.

Такое разнообразие эффективности проветриваний карьера объясняется различными углами откосов карьера, наличием отвалов на его поверхности и сложной конфигурацией въездной траншеи. В карьере без отвалов лучшее проветривание наблюдается при восточном направлении ветра, в карьере с отвалами — при западном. Наихудшее направление ветра для обоих случаев — южное.

Сравнивая полученные результаты, видим, что без отвалов интенсивность естественного проветривания возрастает в среднем по карьере на 15%. Это связано с уменьшением глубины карьера за счет отсутствия отвалов, что способствует сокращению параметров рециркуляционной зоны и времени проветривания. Таким образом, в случае их сноса или переноса на расстояние, равное 10 их высотам (согласно рекомендации Унипромедь), можно уве-

личить интенсивность проветривания карьера и тем самым сократить время его проветривания как при нормальной работе карьера, так и при эпизодических загрязнениях (например, массовых взрывах).

Для выявления возможностей естественного проветривания карьера Первомайский при его глубине до 300 м была продута модель на период отработки карьера без отвалов. Это связано с тем, что на период отработки карьера остается лишь один отвал с восточной стороны. Результаты полученных данных представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что наилучшее проветривание карьера осуществляется при южном направлении ветра. Немного хуже карьер проветривается при западном и восточном направлениях. Наименьшая эффективность проветривания (до 70%) — при северном направлении. Это, по-видимому, объясняется большим по сравнению с другим углом погашения борта карьера ( $32^\circ$ ), на который направлен воздушный поток. Благодаря такому положению карьер при северном ветре проветривается по рециркуляционной

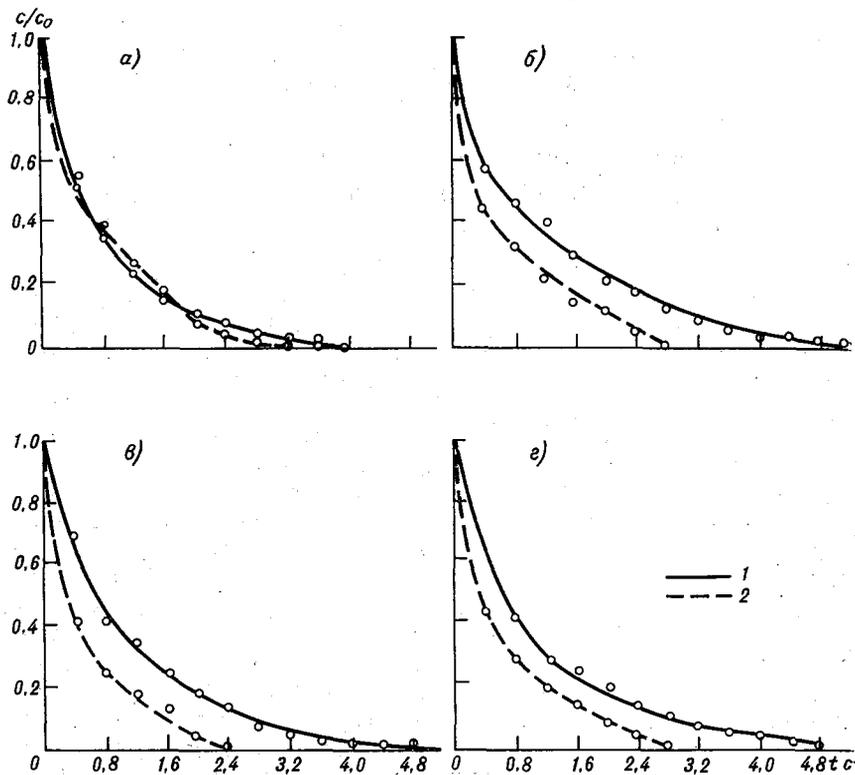


Рис. 1. Сравнительная эффективность естественного проветривания карьера Первомайский на период 1972 г. (1) и момент отработки (2).

а — южное направление ветра, б — северное, в — восточное, г — западное.

схеме и время его проветривания увеличивается. Лучшее проветривание карьера наблюдается при ветре с южной стороны. Это объясняется более плавным входом воздушного потока в карьер за счет того, что он направлен не перпендикулярно бровке уступов, а под углом около  $30^\circ$ , что способствует образованию меньших объемов зон рециркуляции. Наиболее эффективным направлением ветра для этих районов является южное. Сравнивая полученные результаты возможностей естественного проветривания карьеров в 1972 г. и на период его отработки (рис. 1), видим, что эффективность естественного проветривания карьера на период отработки сократилась в среднем на 37%.

Таблица 4

**Сравнительная эффективность естественного проветривания карьера № 1 (положение горных работ на 1973 г.)**

Направление ветра	$kQIV_k$					Эффективность проветривания, %
	1-й опыт	2-й опыт	3-й опыт	среднее по направлениям	среднее по карьере	
В	0,65	0,78	0,7	0,71	0,76	81
З	0,58	0,73	0,62	0,64		73
Ю	0,81	0,82	0,83	0,82		93
С	1,0	0,73	0,9	0,88		100

Для выявления влияния отвалов на степень проветривания карьера в отработанном виде сравнивались данные по продувке модели в восточном направлении. Результаты исследований показывают, что проветривание карьера с отвалами при этом ухудшается на 11% по сравнению с проветриванием без них.

Исследование естественного проветривания карьера № 1 проводилось аналогично исследованиям по карьере Первомайский. Результаты лабораторных исследований представлены в табл. 4. Эффективность проветривания карьера при северном направлении ветра принята за 100%, а эффективность при остальных направлениях пересчитана соответственно. Различная эффективность проветривания объясняется неодинаковыми углами наклона бортов карьера, наличием неразрабатываемого целика породы посередине карьера высотой около 105 м, делящего его на две части, а также сложной конфигурацией самой чаши карьера. Эффективность проветривания при южном направлении ветра незначительно отличается от эффективности при северном направлении. Это связано с тем, что практически северный и южный борта карьера находятся в одинаковых условиях и имеют примерно равные углы погашения: северный —  $22^\circ$ ; южный —  $21^\circ$ . Из двух направлений, западного и восточного, худшее — западное. Это объ-

ясняется тем, что карьер разделен на две части целиком породы, западная часть его глубже (200 м) и борт круче (23°). Поэтому в западной части появляются значительные зоны рециркуляции, которые затрудняют воздухообмен и увеличивают его продолжительность. Лучший воздухообмен при восточном направлении ветра можно объяснить меньшей глубиной восточной части карьера (160 м) и меньшим углом откоса (18°), что способствует более плавному входу воздушного потока в карьер и образованию небольших зон рециркуляции.

Нами было проведено сравнение данных, полученных в лабораторных условиях, по распределению скорости воздушных пото-

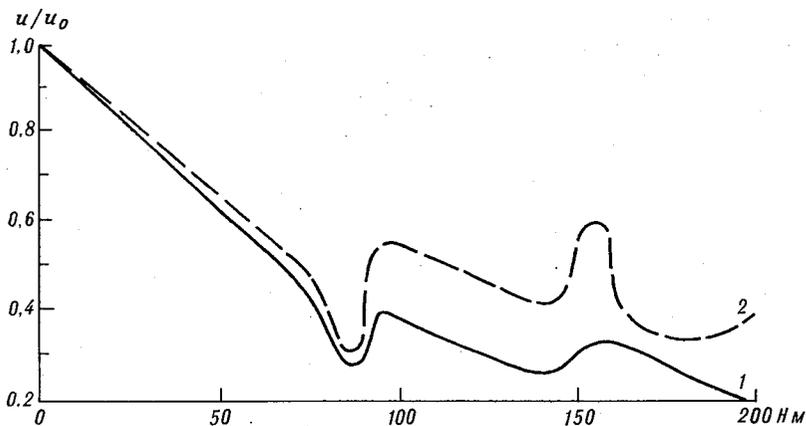


Рис. 2. Относительное изменение скорости воздушного потока по глубине карьера № 1.

1 — замеры на модели, 2 — фактические замеры.

ков на различных горизонтах с фактическими замерами, полученными сотрудниками УкрНИГМИ и ВНИИБТГ (рис. 2).

Определенные расхождения между результатами фактических и лабораторных исследований объясняются различной стратификацией атмосферы карьера и модели, наличием на скальных уступах карьера местных течений воздушных потоков за счет нагрева его бортов. В лабораторных условиях стратификация атмосферы и местные потоки не учитывались. В целом же можно отметить, что с учетом указанных различий моделирования и фактических условий схождение результатов приемлема для суждения о возможности естественного проветривания.

Анализируя полученные данные лабораторных исследований эффективности естественного проветривания карьеров № 1 и Первомайский на два периода, необходимо отметить, что естественное проветривание в период штилей и периодических загрязнений уже не обеспечивает эффективный воздухообмен всего карьера и от-

дельных его участков. Таким образом, для интенсификации воздухообмена всего карьера или его участков необходимо применение средств искусственного проветривания.

Целью дальнейших лабораторных исследований являлось определение оптимальных схем расположения установок искусственного проветривания в карьерном пространстве. При моделировании воздушных потоков выдерживали геометрическое и динамическое подобия. В качестве последнего соблюдали равенство чисел Фруда для природы и модели:

$$Fr = \frac{u^2}{gl},$$

где  $u$  — скорость воздушного потока, м/с;  $g$  — ускорение земного тяготения, м/с<sup>2</sup>;  $l$  — характерный размер, м.

Этот критерий определяет отношение силы вязкости к силе инерции и дает возможность геометрически моделировать дальность струи и производить пересчет параметров при переходе от природы к модели и обратно. Из него

$$u_n = u_m \sqrt{m}$$

( $u_n$ ,  $u_m$  — соответственно скорости воздушных потоков в природе и на модели, м/с);

$$Q_n = Q_m m^2 \sqrt{m}$$

( $Q_n$ ,  $Q_m$  — расход воздуха установки и имитатора, м<sup>3</sup>/с);

$$t_n = t_m \sqrt{m}$$

( $t_n$ ,  $t_m$  — время проветривания в природе и модели, с;  $m = l_n/l_m$  — отношение линейных размеров природы и модели).

Зная размеры карьера, тип установки и ее параметры (расход воздуха, начальную скорость воздушной струи), по вышеизложенным соотношениям выбираем  $u_m$  и  $d_m$  ( $d_m$  — диаметр имитатора, мм).

Исследования проводились на моделях карьера Первомайский на период отработки и карьера № 1 по состоянию на 1973 г. (параметры указаны в табл.1). В качестве побудителя воздушного потока выбраны имитаторы установки НК-12КВ конструкции ИГД МЧМ СССР, имеющей наибольшую производительность по сравнению с другими вентиляционными установками. Имитаторы изготовлены из двух спаянных латунных трубок. По одной из них загрязненный воздух всасывался воздуходувкой ПРВ-1, а по другой чистый воздух подавался в карьер. Модель карьера заполнялась дымом, а затем после выдержки 0,5—1 мин включались в работу имитаторы НК=12КВ. Запись изменения концентрации дыма в модели карьера и обработка осциллограмм производились согласно [3].

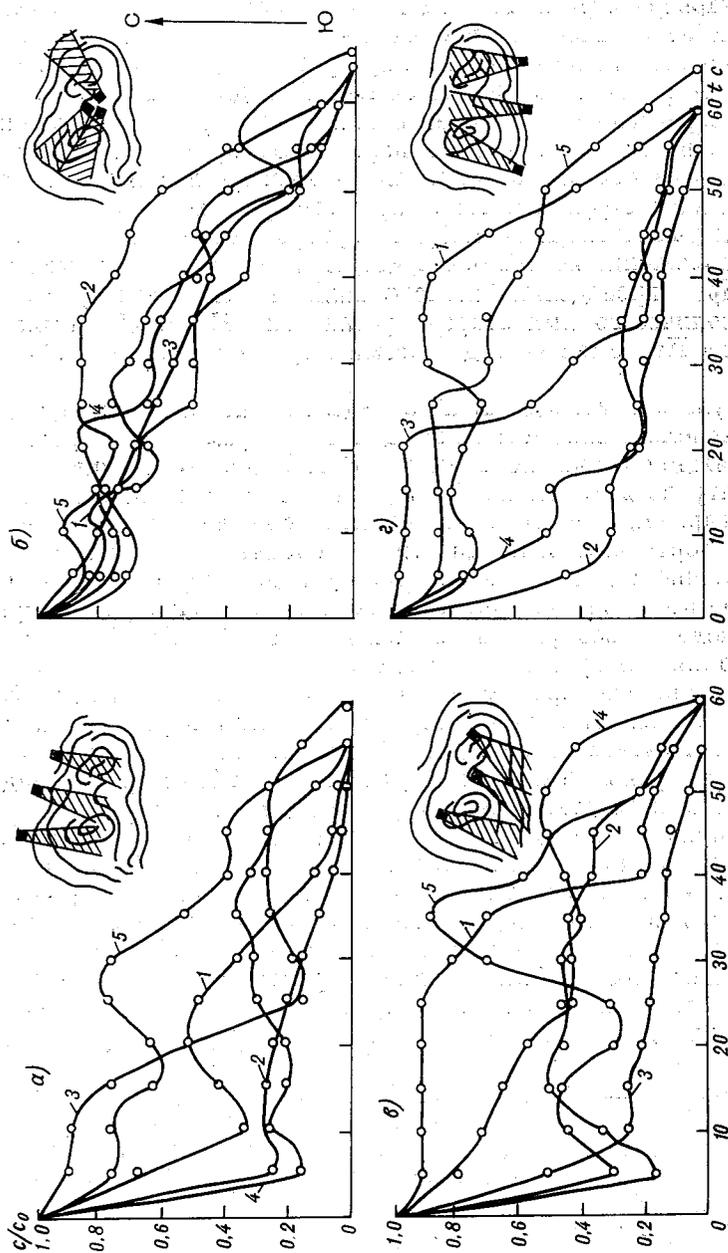


Рис. 3. Эффективность искусственного проветривания горизонтов карьера № 1 при различном размещении вентиляционных установок (а, б, в, г)  
 1) — 100 м, 2) — 70 м, 3) — 85 м, 4) — 55 м, 5) — 85 м.

Количество установок, необходимое для общего проветривания карьера при штилевой погоде, определялось из соотношения объема карьера и расхода воздуха вентиляционной установки, работающей непрерывно на протяжении времени, обеспечивающего вынос примесей из всей модели карьера. Так, для карьера Первомайский их количество равняется шести, а для карьера № 1 — двум. Эффективность проветривания карьеров затопленными струями зависит не только от параметров применяемых установок, но и от места их расположения в карьере и ориентации создаваемых ими струй. Поэтому при выборе схем расположения установок учитывалась геометрия карьеров, особенности их рельефа, расположение источников выделения примесей и другие факторы. При проведении исследований в силу вышеуказанных причин количество имитаторов установки НК-12КВ было доведено для Первомайского до восьми штук, а для карьера № 1 до трех.

В результате исследований определены наиболее приемлемые схемы расположения установок для исследуемых карьеров. При оценке каждой схемы по времени общего проветривания  $t$  и коэффициенту воздухообмена  $kQ/V_k$  установлено: оптимальная схема для карьера Первомайский — расположение установок в два ряда (на борту пять и на дне три) с подачей струй сверху вниз и направленностью их на западный борт, для карьера № 1 — расположение всех трех установок на поверхности карьера (северный борт) с подачей воздуха сверху вниз на южный борт. Изменение концентрации  $c/c_0$  приведены на рис. 3.

Вынос примесей происходит неоднозначно на различных уровнях. Это объясняется тем, что при включении в работу одновременно всех имитаторов каждый из них в первую очередь выносит примесь из зоны действия струи (на графике кривая падает вниз). Затем вследствие эжектирующего действия струя увлекает за собой примесь, находящуюся вне зоны ее влияния (на графике горизонтальные или слабо наклонные линии). На ряде верхних горизонтов карьера снижение  $c/c_0$  происходит медленнее, чем на нижних. Это объясняется тем, что при подаче струй вверх примесь перемещается в том же направлении. Заключительная часть кривых на графике резко стремится к нулю. Происходит это в конечный момент проветривания модели карьера, когда концентрация дыма на всех горизонтах карьера резко снижается.

Как показывают полученные результаты лабораторных исследований искусственного проветривания на обоих карьерах, на выбор ориентации вентиляционных струй в карьерном пространстве и место расположения установок оказывает влияние особенность рельефа карьера.

Эта особенность создает для каждого карьера свою схему расположения установок и может вызывать потребность в дополнительном увеличении их количества по сравнению с расчетными данными.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В. С. Исследование воздухообмена в карьерном пространстве методом физического моделирования на примере Коркинского угольного карьера.—Тр. ИГД МЧМ СССР», 1970, вып. 24, с. 133—141.
2. Филатов С. С. Исследование естественного воздухообмена в глубоких карьерах.—«Сб. работ по силикозу», 1961, вып. 3, с. 91—107.
3. Вершинин А. А., Волков В. С. Использование германиевых фотодиодов при моделировании процессов вентиляции.—«Тр. ИГД МЧМ СССР», 1970, вып. 24, с. 141—144.

В. Н. ЩЕРБАК, В. С. ИВАШКИН, А. Д. ЛУКИН  
В. А. АЛЕКСЕЕВ

## К ВОПРОСУ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА ВНЕШНИМИ ОТВАЛАМИ

Искусственное проветривание карьеров в настоящее время не получило широкого применения, поскольку не налажен серийный выпуск мощных средств вентиляции. Поэтому подавляющая часть карьеров проветривается только за счет естественных сил (ветровой и термической энергии).

Интенсивность воздухообмена повышают за счет ориентирования большой оси карьера и въездных траншей с учетом направления господствующих ветров; уменьшением углов наклона бортов со стороны набегающего ветрового потока; путем освобождения территории, непосредственно прилегающей к карьеру, от сооружений, являющихся аэродинамическими экранами, и устройства специальных воздухозаборов. Причем наибольшая эффективность воздухообмена достигается при условии комплексного применения указанных мероприятий, хотя это не всегда возможно и экономически выгодно.

Из перечисленных мероприятий наиболее перспективным является устройство воздухозаборов из отвалов вскрышных пород, отсыпанных по специальной схеме. При этом рекомендуется высоту воздухозабора делать по возможности максимальной, длина крыльев должна быть не менее 10 высот. Ширина прорана должна равняться половине ширины карьера, а угол взаимного расположения крыльев  $135^\circ$ . Эти данные получены на основе моделирования процессов воздухообмена применительно к рудному карьеру, проветриваемому по рециркуляционной схеме [1, 2].

Вредные примеси в модели имитировались от нагревательного элемента, расположенного на дне карьера.

Использование указанных данных при проектировании угольных карьеров не представляется возможным, поскольку имитация вредных примесей теплом приводит к искажению результатов эксперимента. Кроме того, авторами выполненной ранее работы не установлены взаимодействия между параметрами воздухозабо-

ра и влияние их на интенсивность воздухообмена. Метод комбинационного квадрата, используемый ими при планировании эксперимента, не дает возможности оценить процесс выноса вредных примесей полиномиальной моделью.

В связи с вышеизложенным нами были проведены лабораторные исследования по интенсификации естественного воздухообмена в карьере с учетом указанных упущений.

Гидродинамическое и диффузионное подобие обеспечивалось выполнением экспериментов в автомоделной области и соблюдением геометрического подобия. В этом случае перенос результатов исследований с модели на натуру осуществляется по известным масштабным зависимостям. Масштаб модели был принят 1:200. Размеры карьера: глубина—300 м, ширина—800 м, длина—2560 м, объем—543,8 млн. м<sup>3</sup>.

Эксперименты проводились на стенде, состоящем из незамкнутой аэродинамической трубы с открытой рабочей частью, дымового генератора и аппаратуры управления, контроля и измерения.

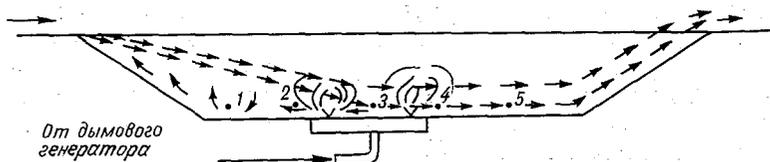


Рис. 1. Расположение датчиков (1—5) в модели карьера.

Исследования выполнялись для условия загрязнения карьерного пространства линейными источниками газовой выделенности, расположенными в зонах прямых и обратных потоков.

Чтобы изучить процессы аэрации внутрикарьерного пространства по отдельным участкам, датчики, регистрирующие концентрацию вредных примесей, располагали в различных зонах (рис. 1): рециркуляции, прямых потоков и в переходной (на границе прямых и обратных потоков).

Измерения производились в придонном слое, для чего источники света располагались на одном из бортов модели карьера, а фотодиоды на другом. Этим удовлетворялись принципы осреднения, повышалась надежность информации. В процессе измерений фотодиоды работали в вентильном режиме. Вредные примеси имитировались дымом паров глицерина, удельный вес которых примерно равен удельному весу воздуха.

Анализ случаев загрязнения атмосферы Коркинского карьера показал, что в подавляющем числе случаев они возникают при скорости набегающего ветрового потока менее 3 м/с. В среднегодовом балансе времени повторяемость скоростей ветра до 3 м/с и на других карьерах наибольшая. Поэтому нами принят верхний предел скорости воздуха при моделировании равным 3 м/с.

Предварительные измерения на модели показали, что в рассматриваемом случае постоянство отношения скорости ветра внутри карьера к ее значению на бровке ( $u/u_0$ ) выдерживается при  $u_0=0,52$  м/с, что обусловило нижний предел скорости воздушно-го потока 0,6 м/с ( $Re=6,6 \cdot 10^3$ ).

Влияние искусственных сооружений (воздухозабора) изучалось с учетом следующих факторов: высоты ( $X_1$ ), длины ( $X_2$ ) и угла взаимного расположения крыльев воздухозабора ( $X_4$ ), ширины прорана ( $X_3$ ), удаления воздухозабора от бровки карьера ( $X_5$ ) и скорости набегающего воздушного потока ( $X_6$ ).

Планирование эксперимента и математическая обработка результатов были выполнены институтом УралНИИСтромпроект.

На первом этапе исследований для оценки значимости линейных эффектов были выполнены эксперименты по плану  $5 \times 5$  Латинского квадрата четвертого порядка, эквивалентного  $1/625$  реплики от полного факторного эксперимента  $5^6$  при 25 опытах, каждый из которых дублировался [3]. Вычислялись дисперсии по каждому из 6 факторов и внутри каждой ячейки. Для проверки гипотезы о значимости эффектов находилось  $F$ -отношение (Фишера), с помощью которого дисперсии по каждому из факторов сравнивались с дисперсиями внутри опыта. Расчетные значения критерия Фишера сравнивались с табличными и, если  $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$ , то линейный эффект при выбранном уровне значимости считался статистически незначимым [3].

Анализ результатов расчетов показывает, что явно незначимым является только линейный эффект фактора  $X_1$  (высоты воздухозабора) по первому датчику. По всем датчикам весьма существенным является линейный эффект фактора  $X_6$  (скорости набегающего воздушного потока).

Если расположить факторы в порядке убывания величины  $F$ -отношения, т. е. в порядке уменьшения влияния линейных эффектов на время проветривания, то прослеживается четко выраженная закономерность уменьшения степени влияния факторов по второму, четвертому и пятому датчикам. Отступление от этой закономерности, наблюдаемое по первому и третьему датчикам, можно объяснить погрешностями измерений и расчетов, так как различия между  $F$ -отношениями для факторов  $X_2$  и  $X_3$  по первому датчику и для  $X_1$  и  $X_5$  по второму невелики. По всем пяти датчикам влияние принятых параметров воздухозабора на интенсивность выноса вредных примесей существенно.

Комбинационный квадрат не дает возможности построить математическую модель процесса проветривания, поэтому на втором этапе исследований было решено использовать факторный эксперимент. В качестве параметра оптимизации было выбрано отношение начальной концентрации дыма к конечной ( $c_0/c$ ) и обратной ему величины ( $c/c_0$ ). Начальная концентрация дыма в модели измерялась до проветривания, а конечная — после установившегося режима выноса примесей.

Анализ априорной информации и однофакторных зависимостей

$c_0/c=f(x_i)$  показал, что процесс проветривания имеет явно нелинейный характер. Поэтому было принято решение аппроксимировать зависимость  $y = \frac{c_0}{c} = f(X_1, \dots, X_6)$  полиномом второй степени вида

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_6 X_6 + b_{1-1} X_1 X_1 + b_{1-2} X_1 X_2 + \dots + b_{5-6} X_5 X_6 + b_{6-6} X_6 X_6.$$

Для реализации эксперимента был выбран план Хартли — Коно, который, обладая неплохими статистическими характеристиками, имеет сравнительно небольшое число точек [4]. Измерения в каждой из 44 точек плана, а также в контрольной дублировались. Для упрощения расчеты выполнялись в безразмерных (кодированных) переменных. Выбранные факторы ( $X$ ) варьировались в следующих интервалах:

физические переменные

$$15 \text{ м} \leq X_1 \leq 75 \text{ м}$$

$$450 \text{ м} \leq X_2 \leq 900 \text{ м}$$

$$400 \text{ м} \leq X_3 \leq 1200 \text{ м}$$

$$60^\circ \leq X_4 \leq 150^\circ$$

$$0 \text{ м} \leq X_5 \leq 880 \text{ м}$$

$$0,6 \text{ м/с} \leq X_6 \leq 3 \text{ м/с}$$

кодированные

$$-1 \leq X_1 \leq +1$$

$$-1 \leq X_2 \leq +1$$

$$-1 \leq X_3 \leq +1$$

$$-1 \leq X_4 \leq +1$$

$$-1 \leq X_5 \leq +1$$

$$-1 \leq X_6 \leq +1$$

Результаты экспериментов проверялись на равноточность по  $G$ -критерию Кохрена [4, 5]. Для всех пяти датчиков и обеих зон  $G_{\text{экс}} < G_{\text{табл}} = 0,1465$ , т. е. эксперименты во всех случаях проведены равноточно.

Методом наименьших квадратов определены коэффициенты при переменных и свободные члены полиномов второй степени каждого датчика. Полученные уравнения проверялись на адекватность экспериментальным данным по  $F$ -критерию Фишера [5]. На уровне значимости  $\alpha = 0,05$  для всех датчиков и зон  $F_{\text{табл}} > F_{\text{экс}}$ , т. е. все уравнения адекватны экспериментальным данным.

Анализ полученных уравнений показывает, что влияние отдельных и вместе взятых параметров воздухозабора на интенсивность выноса вредных примесей имеет очень сложный характер. Это хорошо заметно на рис. 2, где приведены зависимости относительной концентрации ( $c/c_0$ ) от отдельных параметров, когда другие равны const ( $c/c_0 = f(X_1)$  при  $X_2; X_3; X_4; X_5; X_6 = \text{const} = 0$  и т. д.).

Увеличение высоты воздухозабора ведет к усилению выноса примесей. Это хорошо заметно по кривым для отдельных зон и придонной части карьера в целом. Содержание примесей уменьшается наиболее интенсивно при увеличении высоты от 45 до 75 м. Наименьшая концентрация примесей наблюдается при высоте воздухозабора 75 м. В переходной зоне и в зоне обратных потоков заметен некоторый рост концентрации примесей.

Исследуемые зоны	Параметры воздухозабора				
	высота $X_1$	длина $X_2$	ширина $X_3$	угол $X_4$	удаление $X_5$
Зона обратных потоков (д. № 1)					
Зона обратных потоков (д. № 2)					
Переходная зона (д. № 3)					
Зона прямых потоков (д. № 4)					
Зона прямых потоков (д. № 5)					
Зона обратных потоков (д. № 1, 2)					
Зона прямых потоков (д. № 4, 5)					
Придонная часть карьера (д. № 1, 2, 4, 5)					

Рис. 2. Влияние параметров воздухозабора на содержание примесей в различных зонах придонной части карьера,  $c/c_0 = f(X_i)$ .

На интенсивность выноса вредных примесей оказывает влияние и длина крыльев воздухозабора. В рециркуляционной и переходной зонах минимум содержания примесей наблюдается при длине воздухозабора 675 м, а в зоне прямых потоков — при длине 900 м.

Ширина прорана оказывает наиболее сильное влияние в зоне прямых потоков. Для всех зон и придонной части карьера наиболее оптимальной является ширина прорана, равная половине ширины карьера, что составляет для наших условий 400 м.

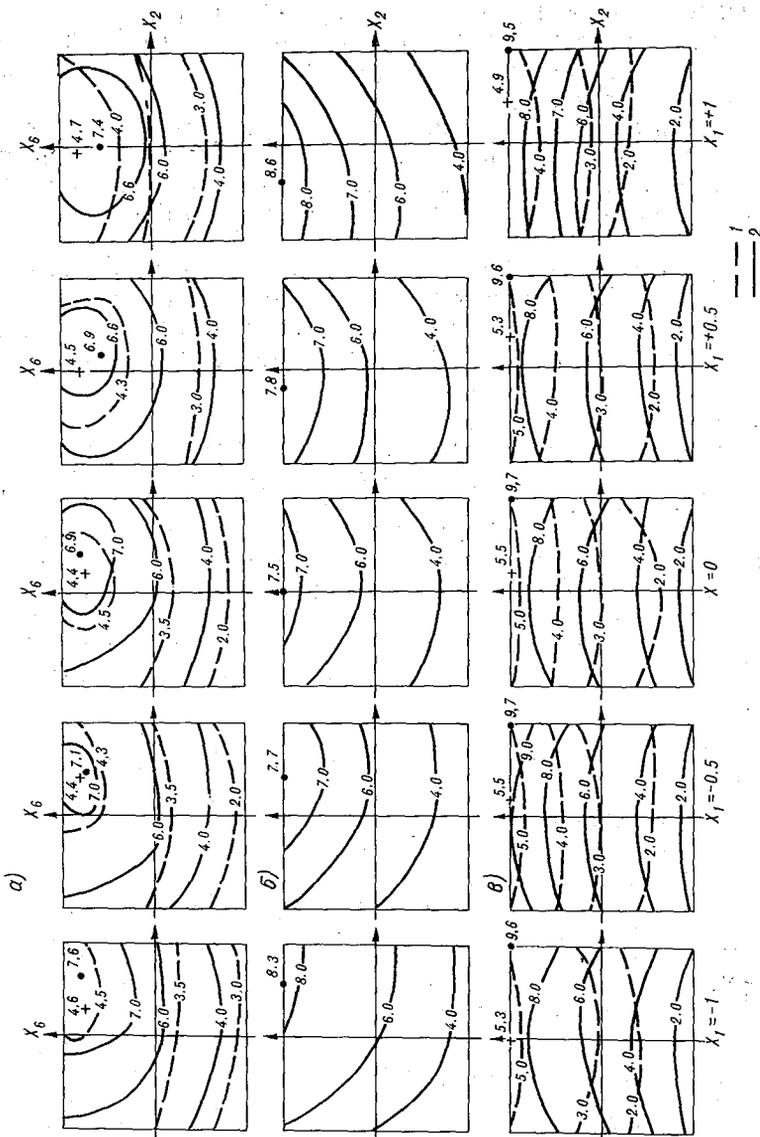


Рис. 3. Линии равных значений функции  $c_0/c = f(X_1, \dots, X_6)$  при  $X_3 = -1$ ,  $X_4 = 0$ ,  $X_6 = 0$ .  
 а — зона обратных потоков, б — переходная зона, в — зона прямых потоков; 1 — четные датчики, 2 — нечетные датчики.

При угле взаимного расположения крыльев воздухозабора, равном  $60^\circ$  в переходной зоне и  $150^\circ$  в зоне обратных потоков, наблюдаются минимальные концентрации примесей. Оптимальный угол взаимного расположения крыльев воздухозабора для всех зон лежит в пределах  $105-150^\circ$ .

Определенное влияние на вынос примесей из придонной части оказывает расстояние воздухозабора от борта карьера. По результатам измерений, минимум концентрации соответствует удалению воздухозабора на 440 м.

Из изучаемых шести факторов наиболее существенное влияние на интенсивность выноса вредных примесей оказывает скорость воздушного потока. Во всех зонах интенсивное снижение концентрации дыма наблюдается при увеличении скорости ветра от 0,6 до 1,8 м/с.

Для определения областей с оптимальными параметрами по максимальной интенсификации естественного воздухообмена с помощью воздухозаборов произведем анализ уравнений, представленных графически на рис. 3, при условии  $X_3 = -1$ ,  $X_4 = 0$ ,  $X_5 = 0$ .

В зоне рециркуляции (рис. 3 а) при скорости набегающего потока 0,6—1,8 м/с усиление интенсивности выноса вредных примесей может быть получено за счет увеличения высоты крыльев воздухозабора. Длина их в этом случае не оказывает существенного влияния на воздухообмен. При увеличении скорости ветра до  $2,4 \text{ м/с} \leq X_6 \leq 3,0 \text{ м/с}$  в зоне рециркуляции достигается наибольшая интенсивность воздухообмена как при минимальной, так и при максимальной высоте воздухозабора, т. е. для этой зоны оптимум лежит в двух областях: 1) при  $X_1 = 15 \text{ м}$ ;  $675 \text{ м} \leq X_2 \leq 900 \text{ м}$ ;  $2,4 \text{ м/с} \leq X_6 \leq 3,0 \text{ м/с}$ ; 2) при  $X_1 = 45 \text{ м}$ ;  $563 \text{ м} \leq X_2 \leq 797 \text{ м}$ ;  $2,4 \leq X_6 \leq 3,0 \text{ м/с}$ .

В зоне прямых потоков (рис. 3 в) высота и длина крыльев воздухозабора мало влияют на интенсивность выноса вредных примесей. В то же время скорость ветра оказывает существенное влияние на интенсификацию воздухообмена.

В переходной зоне (рис. 3 б) оптимум находится в той же области, что и для зоны рециркуляции.

Для всей придонной части карьера оптимум лежит в двух областях, имеющих следующие величины параметров воздухозабора: 1)  $X_1 = 15 \text{ м}$ ,  $675 \text{ м} \leq X_2 \leq 900 \text{ м}$ ;  $X_3 = 400$ ;  $X_4 = 105^\circ$ ;  $X_5 = 440$ ;  $2,4 \text{ м/с} \leq X_6 \leq 3 \text{ м/с}$ ; 2)  $X_1 = 45 \text{ м}$ ;  $563 \text{ м} \leq X_2 \leq 787 \text{ м}$ ;  $X_3 = 400 \text{ м}$ ;  $X_4 = 105^\circ$ ;  $X_5 = 440$ ;  $2,4 \text{ м/с} \leq X_6 \leq 3 \text{ м/с}$ .

Воздухозабор с параметрами, указанными в первой области оптимизации, позволяет усилить вынос вредных примесей в зоне прямых и обратных потоков соответственно на 57 и 35%. Во второй области усиливают воздухообмен на 11% в зоне рециркуляции и в то же время снижают его на 28% в зоне прямых потоков, т. е. действуют отрицательно.

Из двух предложенных областей для интенсификации воздухообмена предпочтительна первая, поскольку здесь параметры воз-

духозабора позволяют получить наибольший эффект выноса вредных примесей и при меньших объемах горных работ.

### Выводы

1. Параметры воздухозабора оказывают сложное влияние на вынос вредных примесей из отдельных зон и всей придонной части карьера. При оптимальном их соотношении вынос вредных примесей из отдельных участков и зон можно интенсифицировать. Однако при других соотношениях можно получить отрицательный эффект вентиляции.

2. Один и тот же эффект усиления воздухообмена достигается при различных объемах горных работ, затрачиваемых на сооружение воздухозабора, что необходимо учитывать при их сооружении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В. И., Бухман Я. З. Интенсификация естественного проветривания карьеров.— Тезисы докладов к совещанию «Борьба с пылью на открытых горных работах». М., изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1969, с. 15—16.
2. Белоусов В. И. Перспективы интенсификации динамического проветривания карьеров.— Тезисы докладов научно-технического семинара по разработке технических мероприятий проветривания карьеров. Свердловск, изд. ЦНИИТМ, 1969, с. 14—15.
3. Руководство по применению латинских планов при планировании эксперимента с качественными факторами. Челябинск, Южно-Уральское книжное издательство, 1971. 156 с.
4. Андрукович П. Ф., Голикова Т. И., Костина С. Г. Планы второго порядка на гиперкубе, близкие по свойствам к *D*-оптимальным.— В кн.: Новые идеи в планировании эксперимента. М., «Наука», 1969, с. 140—153.
5. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов. М., «Наука», 1965. 340 с.

## ОЦЕНКА ВОЗДУХООБМЕНА В КАРЬЕРАХ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ И КОВДОРСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА<sup>1</sup>

На интенсивность воздухообмена в карьерах существенное влияние оказывают глубина и форма последних, углы наклонов бортов, расположение поверхностных сооружений и многие другие факторы. Своевременное изучение влияния указанных факторов на аэрацию карьеров при различных стадиях отработки позволит заблаговременно разработать и внедрить мероприятия, направленные на интенсификацию воздухообмена, и определить время ввода в действие искусственной вентиляции. Это позволит не допустить загрязнения атмосферы карьеров выше допустимого уровня и обеспечить бесперебойную работу горнотранспортного оборудования при любой метеорологической ситуации.

В данной работе приведены результаты исследований естественного и искусственного воздухообмена в карьерах Курской магнитной аномалии и Ковдорского горно-обогатительного комбината (ГОК), выполненные с учетом перспективы развития карьеров. Естественный воздухообмен в карьере Ковдорского ГОКа изучался методом физического моделирования проектируемого состояния горных работ на 1975 и 1978 гг. Модель карьера и окружающей местности выполнены в масштабе 1:1500 (рис. 1). Результаты исследования приведены в табл. 1 и 2.

Из данных таблиц следует, что наиболее неблагоприятные условия для проветривания карьера в 1975 г. создадутся при ветрах западного, юго-западного и северо-западного направлений, а в 1978 г. — при северном и юго-западном направлениях. Из этого можно сделать вывод, что проведение работ в карьере, связанных с интенсивным выделением вредных примесей в атмосферу (в частности, массовых взрывов), необходимо приурочивать до 1978 г. к ветрам северного, восточного и южного направлений, а после

<sup>1</sup> Работа выполнена под научным руководством канд. техн. наук С. С. Филова.

1978 г. — к ветрам западного, восточного, южного и северо-западного направления.

Одновременно установлено, что с развитием горных работ в северном направлении эффективность естественного воздухообмена за счет энергии ветра возрастает в среднем на 8—10%. Развита отвала в северном направлении с перекрытием реки снижает эффективность воздухообмена в карьере в среднем на 5% в 1975 г.

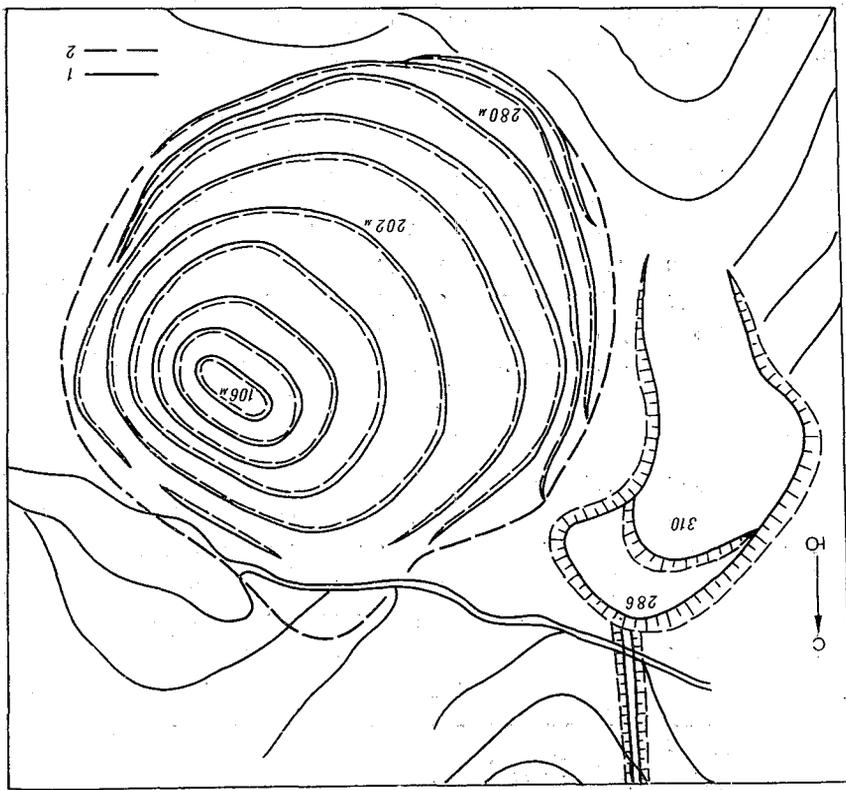


Рис. 1. План горных работ карьера Кувшиновского ГОКа. 1 — контур карьера на 1975 г., 2 — на 1978 г.

В 1978 г. дамба влияния на воздухообмен не будет оказывать. Следует отметить, что при моделировании не учитывалось влияние на воздухообмен естественных местных потоков воздуха, возникших за счет перепадов температур в долине реки. Интенсивность потоков, как известно, достигает значительной величины и может оказать существенное влияние на воздухообмен в карьере. С учетом этого обстоятельства следует признать, что перекрытие долины реки отвалами нецелесообразно.

Оценка естественного воздухообмена в карьерах КМА выполнена по методике В. С. Никитина [1]. Исходные данные для расчетов были предоставлены институтом «Ленгипроурал». Результаты расчетов приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что интенсивность поступления пыли в атмосферу карьеров очень велика. Время накопления пыли до ИДК в атмосфере карьеров в пределах 4,2 ч в Лебединском и Михайловском карьерах. Значительная интенсивность пылеобразования объясняется использованием в карьерах для перевозки горной массы автомобильного транспорта в больших масштабах. С внедрением разрабатываемых в настоящее время средств борьбы с пылью интенсивность образования ее снизилась в среднем в 2,5 раза. Однако в Стойленском карьере она остается все же довольно высокой.

Примечание. Здесь и в табл. 2  $k$  — коэффициент эффективности проветривания;  $Q$  — количество чистого воздуха, поступающего в карьер,  $m^3/c$ ;  $V_k$  — объем карьера,  $m^3$ .

Направление ветра	При планируемом развитии горных работ (без дамбы)	При сооружении дамбы
1975 г.		
Западное	0,39	1,00
Северное	0,81	2,10
Восточное	0,87	2,20
Южное	0,96	2,46
Северо-западное	0,51	1,30
Юго-восточное	0,56	1,44
1978 г.		
Западное	0,72	1,00
Северное	0,55	0,76
Восточное	0,93	1,30
Южное	0,78	1,10
Северо-западное	0,71	0,99
Юго-западное	0,44	0,61
Коэффициент	0,64	0,46

Направление ветра	При планируемом развитии горных работ (без дамбы)		При сооружении дамбы	
	$\frac{Q}{k}$	эффективность проветривания	$\frac{Q}{k}$	эффективность проветривания

Таблица 1  
Влияние на интенсивность проветривания карьера Ковдорского ГОКа окружающей местности и насыпной дамбы (за единицу принята эффективность проветривания карьера ветром западного направления)

Таблица 2

Влияние на интенсивность проветривания карьера  
Ковдорского ГОКа развития горных работ  
(эффективность проветривания в 1975 г.  
по всем направлениям ветров принята равной 1)

Направление ветра	1975 г.		1978 г.	
	$\frac{kQ}{V_k}$	эффектив- ность про- ветривания	$\frac{kQ}{V_k}$	эффектив- ность про- ветривания
Западное . . . . .	0,39	1,00	0,72	1,85
Восточное . . . . .	0,87	1,00	0,93	1,07
Северное . . . . .	0,81	1,00	0,55	0,68
Южное . . . . .	0,96	1,00	0,78	0,81
Северо-западное . . . . .	0,51	1,00	0,71	1,40
Юго-западное . . . . .	0,56	1,00	0,44	0,79

Таблица 3

Исходные данные для расчета вентиляции карьеров КМА

Показатели	Карьеры		
	Лебединский	Стойленский	Михайловский
Объем карьера, млн. м <sup>3</sup> . . . . .	358	168	388
Глубина, м . . . . .	240	150	110
Размер в плане, м <sup>2</sup> . . . . .	1800×2100	1280×1500	1850×3900
Отношение:			
ширины к глубине . . . . .	7,5	8,5	16,7
длины к глубине . . . . .	8,5	10,0	35,4
Суммарная интенсивность выделения пыли в карьере, мг/с . . . . .	$\frac{35\ 283}{12\ 806}$	$\frac{28\ 935}{12\ 656}$	$\frac{38\ 907}{14\ 557}$
Потребное количество свежего возду- ха, м <sup>3</sup> /с:			
по пыли . . . . .	$\frac{38\ 100}{13\ 800}$	$\frac{31\ 300}{13\ 700}$	$\frac{42\ 000}{15\ 700}$
по газу . . . . .	18 523	13 743	15 353
Время накопления пыли в атмосфере карьера до ПДК, ч . . . . .	$\frac{4,2}{11,4}$	$\frac{2,4}{5,6}$	$\frac{4,2}{11,1}$

Примечание. В числителе приведены данные на 1976 г., в знаменате-  
ле — данные при полном внедрении средств пылегазоподавления.

Естественный воздухообмен в карьерах КМА исследован при восьми направлениях ветров (табл. 4). Установлено, что наиболее благоприятные условия для проветривания имеются в Михайловском карьере: из восьми направлений ветров он только по одному проветривается по рециркуляционно-прямоточной схеме. Значительно затруднен воздухообмен в Стойленском и Лебединском

Таблица 4  
Схема естественного проветривания и критическая скорость воздуха (м/с) на карьерах КМА

Направление ветра	Карьеры		
	Лебединский	Стойленский	Михайловский
Северное . . . . .	РП 0,85	РП 1,25	П 0,24
Северо-восточное . . . . .	Р 0,77	РП 1,15	П 0,19
Восточное . . . . .	Р 0,75	П 0,48	РП 0,53
Юго-восточное . . . . .	РП 0,85	П 0,57	П 0,18
Южное . . . . .	П 0,33	П 0,62	П 0,28
Юго-западное . . . . .	П 0,36	П 0,50	П 0,18
Западное . . . . .	П 0,25	РП 0,92	П 0,16
Северо-западное . . . . .	РП 0,92	РП 1,10	П 0,13

Примечание. Схемы проветривания: РП — рециркуляционно-прямоточная, П — прямоточная, Р — рециркуляционная.

ском карьере: первый проветривается при четырех исследованных направлениях по рециркуляционно-прямоточной схеме, а второй — при пяти. При этом в Лебединском карьере из пяти направлений ветров два являются господствующими. Таким образом, искусственная вентиляция в первую очередь потребуется в этих карьерах. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что критическая скорость ветра на поверхности, ниже которой возникает необходимость в применении средств вентиляции, по отдельным направлениям превышает 1 м/с. По данным метеороло-

гических наблюдений, периоды со скоростью ветра до 1 м/с для районов карьеров составляют в среднем 25%. Следовательно, вероятность загрязнения атмосферы вредными примесями выше допустимого уровня (если учесть, что периоды штилей составляют около 10% общего времени) весьма большая. Однако следует отметить, что в расчетах не учтена роль термического фактора

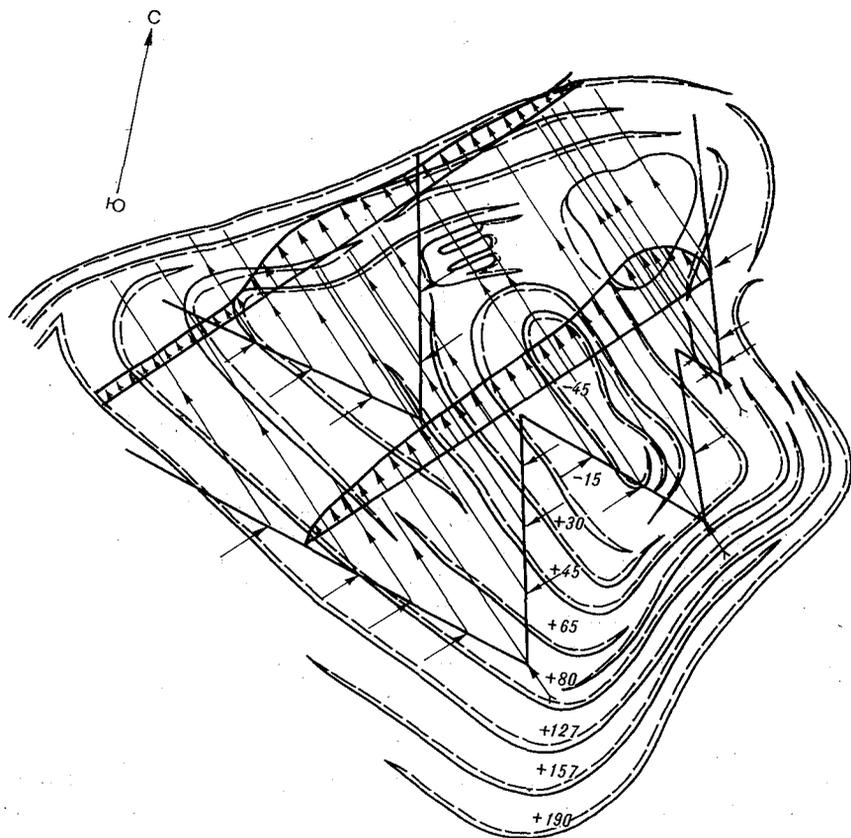


Рис. 2. Схема вентиляции Лебединского карьера.

в проветривании карьеров. Но тем не менее внедрению искусственной вентиляции, особенно местной, в карьерах КМА уже на данном этапе обработки должно уделяться самое серьезное внимание.

Для выбора средств и схем искусственной вентиляции в карьерах КМА применен метод физического моделирования [2]. Исследования проводились на моделях карьеров, выполненных в масштабе 1:1000. Моделирование показало, что эффективное

проветривание может быть осуществлено в Лебединском карьере с применением 4 вентиляторов НК-12КВ, в Михайловском — 6, в Стойленском — 3. Время проветривания при этом не будет превышать 1 ч. При повторно-кратковременном режиме работы вентиляторов и данной интенсивности поступления вредностей в атмосферу достаточно двух включений в течение смены. Наиболее целесообразной схемой вентиляции для Лебединского карьера явля-

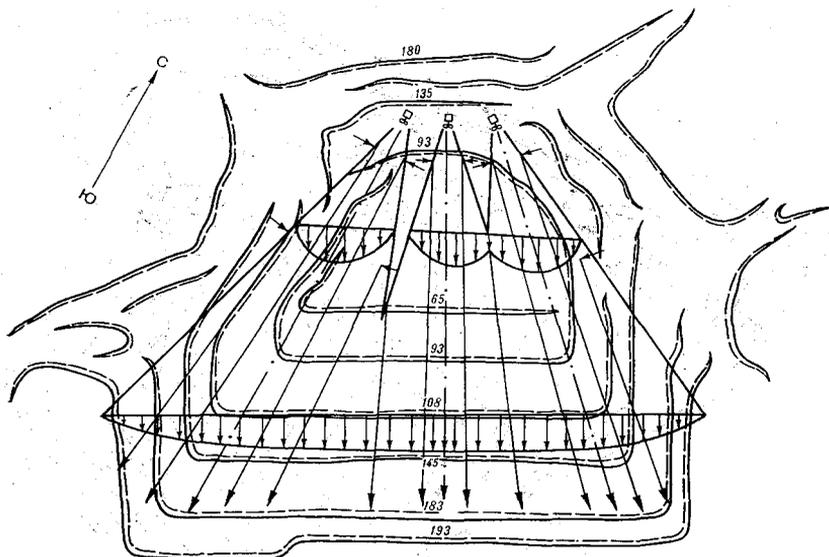


Рис. 3. Схема вентиляции Стойленского карьера.

ется схема с параллельным расположением четырех вентиляторов НК-12КВ и выдачей загрязненного воздуха в северо-западном направлении; для Михайловского — схема с каскадным расположением вентиляторов в два ряда и выдачей загрязненного воздуха в южном направлении; для Стойленского — схема с параллельным расположением трех вентиляторов в ряд на расстоянии 70—100 м друг от друга и выдачей загрязненного воздуха в юго-западном направлении (рис. 2 и 3).

Интересно отметить, что с увеличением глубины Лебединского карьера до 250 м для выноса загрязненного воздуха целесообразнее будет применять вертикальные воздушные струи, создаваемые вентиляторами типа АВК-4 [3].

В случае оборудования системой подачи воды в воздушную струю, вентиляторы НК-12КВ при положительных температурах воздуха могут использоваться для кондиционирования и гидро-

обеспыливания воздуха на нижних горизонтах. При расходе воды не менее  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$  на один вентилятор они могут успешно применяться для подавления пылегазового облака, образующегося при массовых взрывах.

### Выводы

1. При проектировании обработки месторождений полезных ископаемых открытым способом необходимо включать в проект в качестве составных элементов оценку естественного воздухообмена и искусственной вентиляции карьеров.

2. С целью снижения гарантийного минимума скорости ветрового потока в карьерах КМА самое серьезное внимание необходимо уделять внедрению средств борьбы с пылью при всех технологических процессах. Массовые взрывы следует производить при скорости на поверхности не ниже критической для данного направления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. М., Госгортехиздат, 1963. 251 с.
2. Филатов С. С., Вершинин А. А., Волков В. С. Сравнительная оценка схем искусственной вентиляции Коркинского карьера на основе физического моделирования.— «Уголь», 1970, № 11, с. 43—47.
3. Филатов С. С. О средствах и режимах искусственного проветривания карьеров.— Горный журнал, 1973, № 6, с. 22—26.

## ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ПО УСИЛЕНИЮ ЕСТЕСТВЕННОЙ АЭРАЦИИ КАРЬЕРОВ

Как известно, развитие карьерного пространства в объеме и в глубину происходит в соответствии с экономически обоснованным режимом горных работ, который разрабатывается на определенные перспективно обозримые интервалы времени.

Основными геометрическими параметрами, характеризующими карьерное пространство, являются его объем, площадь открытой части, угол наклона бортов, площадь поверхности нижних горизонтов и степень вытянутости карьера в плане.

Большой объем выполненных исследований, несмотря на недостаточное совершенство используемых методов, позволил обнаружить существенные закономерности естественного воздухообмена карьерного пространства в зависимости от перечисленных его геометрических параметров. При этом получены представления о структуре и воздухообмене рециркуляционной зоны [1], данные о зависимости границ раздела прямоочной и рециркуляционной зон от угла наклона подветренного борта [2]. Имеются сведения о зависимости интенсивности воздухообмена в карьерном пространстве от направления ветрового потока к главной оси карьера [3]. Как известно, при определенных метеорологических условиях нарушается материальный обмен между карьерным пространством и окружающей средой, что вызывает энергетический дефицит и устойчивость карьерной атмосферы.

Необходимо отметить, что часто явление внутрикарьерной устойчивости наблюдается при довольно значительных энергетических ресурсах внешней атмосферы (при скоростях ветра 1—3 м/с). Поэтому вполне оправдана попытка многих исследователей разработать методы эффективного использования этих ресурсов. Карьерное пространство как аэродинамическая система в отдельных случаях является весьма несовершенным, поскольку ветровые потоки при подходе к нему срываются с верхней кромки борта, оставляя ниже своей границы застойные зоны.

Анализ обтекания различных тел аэродинамическими потоками показывает, что возможно создание такого профиля бортов карьерного пространства, при котором влияние энергии ветровых потоков на интенсивность воздухообмена всего пространства может быть в значительной степени усилено.

Создание плавного профиля перехода от горизонтальной поверхности прикарьерной зоны к профилю выработанного пространства, выполненного под определенным радиусом, в соответствии с известными аэродинамическими законами [4] может обеспечить безотрывность ветрового потока на входе в карьер, значительно увеличить угол раздела прямоточного и рециркуляционного потоков и соответственно снизить объем застойных зон. По сравнению с рядом известных методов это направление требует значительно меньших затрат на его реализацию. Карьерное про-

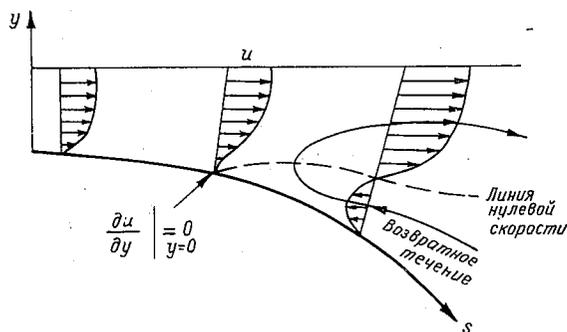


Рис. 1. Схема обтекания плавных аэродинамических профилей.

странство при этом совершенствуется как аэродинамическая система.

Проблема отрыва потоков в аэродинамике занимает особое место. Объяснение его основано на теории пограничного слоя и связано со свойством «прилипания» вязкой жидкости к твердой поверхности обтекаемого тела [4].

В классической теории точка в потоке, где  $\frac{du}{dy} \Big|_{y=0} = 0$ , определяется как точка отрыва (рис. 1). Так как на стенке в точке отрыва напряжение трения  $\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0}$  обращается в нуль, вязкая сила исчезает. В точке за отрывом под действием положительного градиента давления возникает возвратное течение.

Уравнение количества движения для установившегося двумерного течения жидкости в пограничном слое имеет вид

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (1)$$

На стенке, где  $u=v=0$ , это уравнение сводится к

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} \quad (2)$$

Ввиду роста давления вниз по потоку от точки отрыва

$$\frac{\partial p}{\partial x} > 0, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} > 0. \quad (3)$$

На стенке выше точки отрыва  $\frac{du}{dy} > 0$ . Вблизи границы пограничного слоя, на которой вязкие силы исчезают и  $du/dy=0$ , величина  $du/dy$  уменьшается, а величина  $d^2u/dy^2$  становится отрицательной. Следовательно, на некотором расстоянии от стенки  $d^2u/dy^2=0$  и профиль имеет точку перегиба.

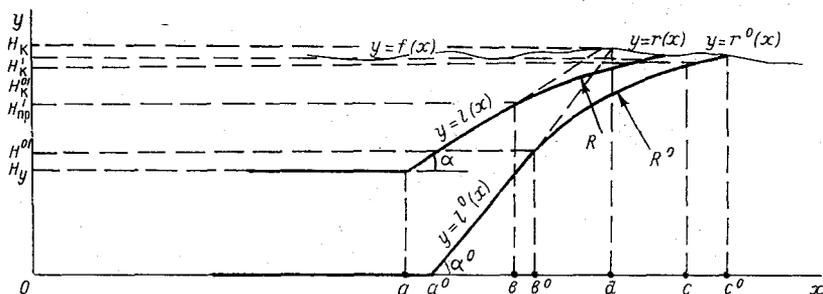


Рис. 2. Схема слагающих элементов плавного аэродинамического профиля борта карьера.

К сожалению, в аэродинамике не имеется достаточно близких аналогий количественного описания процесса обтекания выемок с плавными бортами. Поэтому одной из задач в обосновании предлагаемого метода является постановка специальных теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих получить оптимальные геометрические параметры профиля бортов.

Следующими задачами являются технологическое и экономическое обоснование метода, поскольку его реализация заставляет пересматривать ряд положений в проектных расчетах эксплуатации месторождений открытым способом и может быть оправдана лишь при значительном экономическом эффекте.

При профилировании борта карьера необходимо выявить ряд характерных параметров, оперируя которыми можно решать задачи оптимальной реализации метода.

На рис. 2 в координатах  $x, y$  показан элемент борта карьера в двух вариантах (обычном и с плавным профилем). На рисунке введены следующие обозначения:

- а) поверхность внекарьерной зоны,  $y=f(x)$ ;
- б) дно карьера на момент обработки,  $y=0$ ;

в) дно карьера на одной из промежуточных стадий отработки,  $y = H_y$ ;

г) положения борта карьера на промежуточной и окончательной стадиях отработки,  $y = l(x)$  и  $y = l^0(x)$ ;

д) положения обтекаемых профилей на промежуточной и окончательной стадиях отработки,  $y = r(x)$  и  $y = r^0(x)$ ;

е) радиусы профиля на промежуточной и окончательной стадиях отработки,  $R$  и  $R^0$ ;

ж) положения профиля в пространстве по высоте и горизонтальной вытянутости на промежуточной и окончательной стадиях,  $\Delta H = H'_k - H'_{пр}$  и  $\Delta H^0 = H'^0_k - H'^0_{пр}$ .

Имея числовые значения указанных обозначений, можно рассчитывать объемы вынимаемой породы для формирования обтекаемого профиля, характеризующие затраты на реализацию метода.

Объем вынудой породы на формирование профиля к одной из стадий отработки карьера на единицу длины вдоль борта можно определить как

$$V_i = \int_b^d l(x) dx + \int_a^c f(x) dx - \int_b^c r(x) dx. \quad (4)$$

Учитывая, что часть объемов горных пород при формировании плавного профиля попадает в пределы контура карьерного пространства при его последующем развитии, общий объем вынутых горных пород можно ограничить в соответствии с выражением

$$V_0 = \int_0^d l^0(x) dx + \int_a^{c^0} f(x) dx - \int_b^{c^0} r^0(x) dx. \quad (5)$$

Вводя стоимость выемки единицы горных пород  $C$ , можно определить затраты на формирование профиля как

$$Z = CV_0. \quad (6)$$

Существует множество вариантов целесообразной протяженности участков формирования аэродинамического профиля в плане в зависимости от метеорологических и орографических условий. Предельными случаями являются формирование профиля со стороны одного из направлений и формирование профиля по всему замкнутому контуру бортов.

При равновероятных направлениях ветров, с которыми связаны устойчивые состояния атмосферы в карьере, при планировании горных работ и затрат на выемку горных пород можно ориентироваться на такой критерий, как отношение объемов рециркуляционной ( $W_{рец}$  и прямочной  $W_{пр}$  зон) в карьерном пространстве при соответствующих направлениях ветра. Тогда вынимаемые объемы горных пород на бортах карьера распределятся в соответствии с выражением

$$kV = \frac{W_{рец}}{W_{пр}}, \quad (7)$$

где  $k$  — константа, подлежащая определению.

Если вероятность массового загрязнения карьерного пространства связана с определенными направлениями ветра, то объемы вынимаемых горных пород при формировании аэродинамического профиля целесообразно распределить по контуру бортов со значениями этих вероятностей.

Основной целью этого вида горных работ следует считать сокращение простоев технологических процессов в карьере при массовых загрязнениях карьерного пространства, что на языке экономических интересов предприятия будет означать сохранение определенной доли прибыли.

Обозначая долю сохраняемой текущей прибыли через  $\Delta\Pi(t)$ , а текущие затраты на формирование профиля через  $Z(t)$ , можно в общем виде сформулировать экономическую сторону задачи: уровень затрат на формирование профиля и их распределение во времени должны быть такими, чтобы в течение всего периода существования предприятия  $T$  обеспечить суммарный эффект в виде

$$\mathcal{E} = \int_0^T \{\Delta\Pi(t) - Z(t)\} dt \rightarrow \max. \quad (8)$$

Решение данной задачи может быть успешно обеспечено методом динамического программирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. Госгортехиздат, М., 1963. 248 с.
2. Ушаков К. З., Силаев В. В., Старостин И. И. О влиянии геометрии карьера на параметры свободной струи.— «Изв. вузов. Горный журнал», 1974, № 5, с. 85—88.
3. Битколов Н. З., Иванов И. И. Основные закономерности и расчет естественного проветривания карьеров энергией ветра.— «Тр. ГГО», 1970, вып. 270, с. 132—143.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1970 г. 904 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УСИЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ АЭРАЦИИ КАРЬЕРОВ ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАВНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ БОРТОВ

Как известно, ветровые потоки при подходе к карьерному пространству срываются с верхней кромки бортов и, распространяясь, создают границу раздела между зонами интенсивного и слабого проветривания. Угол этой границы находится в пределах 15—18° и зависит, в частности, от угла наклона бортов [1].

Имеется ряд попыток усиления интенсивности воздухообмена на нижних горизонтах путем специальных технологических решений [2, 3, 4].

В результате анализа обтекания различных тел и профилей в лаборатории рудничной вентиляции и охраны труда ЛГИ разработан метод усиления естественной аэрации карьеров путем придания верхней части бортов плавного аэродинамического профиля.

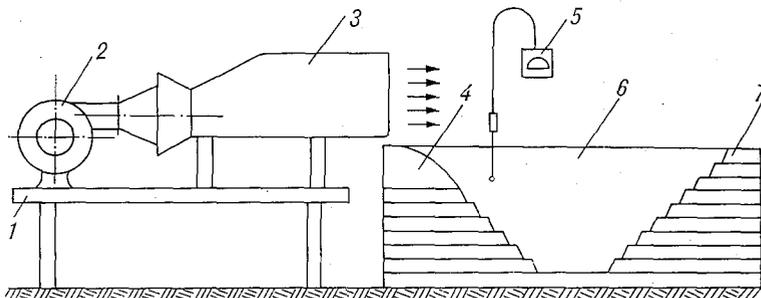


Рис. 1. Схема экспериментальной модели карьера.

1 — подставка, 2 — вентилятор, 3 — аэродинамическое устройство, 4 — плавный профиль борта, 5 — термоанемометр, 6 — карьерное пространство, 7 — сменные элементы бортов.

Основными определяющими геометрическими параметрами профиля являются радиус закругления  $R$  и высота профиля  $H$ . Для выявления связи указанных параметров со скоростями обтекающих воздушных потоков и определения условий срыва потоков с профиля потребовались специальные экспериментальные исследования.

Эти исследования проводились на модели карьера, имитирующей естественные условия в масштабе 1:500 (рис. 1). Поддача воздушного потока над поверхностью карьера производилась вентилятором 2 и эжектирующим устройством 3 с выравнивающими решетками. Скорость потока регулировалась задвижкой на входе в вентилятор в достаточно широком диапазоне.

Конструкция модели позволяет менять углы наклона бортов, имитировать различные стадии отработки карьерного пространства.

Измерение и контроль ветрового потока производились с помощью термоанемометра ТА-8-ЛИОТ. Контроль положения датчика анемометра производился визуально по координатной сетке, нанесенной на стенку из органического стекла модели.

При замерах период определения в точке равнялся 60 с, что позволяло исключить влияние на показания фактора турбулентных пульсаций. Плавный аэродинамический профиль верхней части бортов карьеров имитировался специальными вставками с различными радиусами закругления и значениями высоты.

Рис. 2. Зависимость скорости срыва воздушного потока от геометрических параметров плавного аэродинамического профиля борта.

1 — профили с фиксированным  $R$ ,  
2 — профили с фиксированным  $h$ .

Точка отрыва воздушного потока на поверхности профиля регистрировалась визуально при задымлении входящего потока, а также анемометром (в точке отрыва регистрируется скачок снижения скорости).

На основании достаточно большого объема экспериментальных наблюдений обнаружено, что скорость воздушного потока, радиус закругления профиля и его высота находятся в тесной связи. Значение скорости срыва потока  $v_{кр}$  с поверхности профиля может быть аппроксимировано гиперболической зависимостью (рис. 2) или по формуле

$$v_{кр} = \frac{0,8R}{H}$$

Эксперименты показали, что угол наклона границы прямооточной части воздушного потока может быть увеличен до 30—45°.

В настоящее время ведется подготовка проверки метода усиления ветровых потоков в условиях производства.

Изложенный подход усиления естественной аэрации карьерного пространства является одним из возможных путей использования природных ресурсов при решении одной из наиболее серьезных народнохозяйственных проблем. Экономический эффект предлагаемого способа может быть подсчитан из сопоставления затрат на его реализацию и осуществление искусственной вентиляции карьера известными способами при равных подачах воздуха на нижние горизонты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков К. З., Силаев В. В., Старостин И. И. О влиянии геометрии карьера на параметры свободной струи.— «Изв. вузов. Горный журнал», 1974, № 5, с. 85—88.
2. Бухман Я. З., Белоусов В. И. Улучшение естественного воздухообмена в карьерах.— «Сб. работ Свердловской ГМО», 1970, вып. 10, с. 38—43.
3. Уразбаев С. С. и др. Оценка интенсификации естественного проветривания карьеров.— В кн.: Борьба с запыленностью и загазованностью при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в районах сухого и жаркого климата. Ташкент, изд. Средазнипроцветмет, 1972, с. 18—19.
4. Уразбаев С. С., Ахмеджанов Т. К., Радченко Г. А. Расчет проветривания при эксцентричном способе открытой отработки месторождения.— В кн.: Борьба с запыленностью и загазованностью при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в районах сухого и жаркого климата. Ташкент, изд. Средазнипроцветмет, 1972, с. 33—34.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В КАРЬЕРАХ

Практика эксплуатации глубоких карьеров свидетельствует о многочисленных вынужденных простоях горнорудных предприятий из-за нарушения естественного воздухообмена в них при неблагоприятных сочетаниях метеорологических параметров [1]. Особенно сложная ситуация складывается в случае инверсионного распределения температуры в пределах карьерного пространства, а также при малых значениях скорости поверхностных воздушных потоков, что часто отмечается в карьерах в зимний и весенний периоды года. При этом все выделяющиеся газы и пыль остаются в рабочей зоне, а их концентрации значительно превышают предельно допустимые значения.

Геотермическими исследованиями в карьерах [2, 3] установлено, что в зимний период года температура слоев грунта значительно выше температуры воздуха (рис. 1). Это позволяет использовать для активизации естественного воздухообмена в карьерах тепловую энергию глубоких слоев почвы.

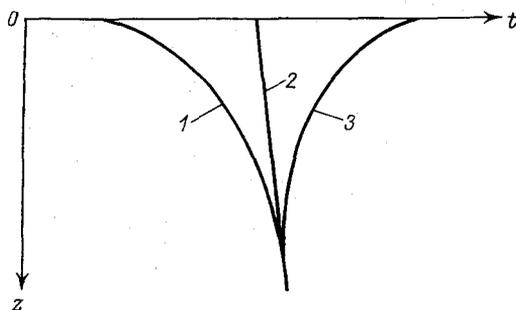


Рис. 1. Характер изменения температуры горных пород по глубине.

1 — распределение температуры в зимний период, 2 — линия геотермического градиента (среднегодовые значения температуры), 3 — распределение температуры летом.

использовать для активизации естественного воздухообмена в карьерах тепловую энергию глубоких слоев почвы. В литературе имеются сведения о возможности применения глубинного тепла земли для некоторых технологических целей горных предприятий, и в частности для оттаивания дренажных полигонов [4, 5]. Аналогичное использование тепла горных пород возможно и в карьерах.

Для предупреждения

возникновения или ликвидации возникшей инверсии путем активизации естественного воздухообмена в карьере с использованием тепловой энергии глубоких слоев почвы в наиболее потенциально опасных местах (на дне или в борту карьера) проходится горная выработка или система скважин (рис. 2). На поверхности почвы устанавливается побудитель тяги теплоносителя. В качестве теплоносителя может использоваться непосредственно воздух, закачиваемый из рабочей зоны карьера, или вода, циркулирующая в замкнутой системе трубопроводов. В качестве побудителя тяги может использоваться маломощный вентилятор или гидравлический насос.

Теплоноситель, проходя через нижние слои грунта, нагревается, а поступая вновь в рабочую зону карьера, способствует увеличению общего теплосодержания приземного слоя воздуха, раз-

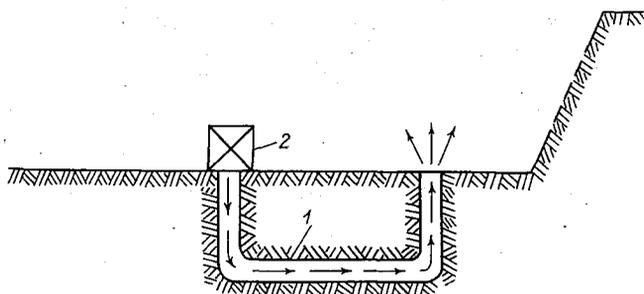


Рис. 2. Схема интенсификации естественного воздухообмена в карьере с использованием тепловой энергии грунта.

1 — горная выработка, 2 — побудитель тяги теплоносителя.

витию конвективных потоков и разрушению инверсионной стратификации в карьере.

Оценим в первом приближении возможность использования тепловой энергии для интенсификации естественного воздухообмена. Пусть горная выработка пройдена в массиве пород на глубине  $z$ . При перемещении воздушных масс, используемых, например, в качестве теплоносителя и подаваемых с поверхности грунта, за счет теплообмена со стенками выработки температура воздуха возрастает. Так как передача тепла от стенок теплопроводностью и излучением весьма мала по сравнению с конвекцией, можно считать, что теплообмен по поверхности выработки определяется по закону Ньютона

$$Q = \alpha(t_c - t_b)F\tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $t_c$  и  $t_b$  — соответственно средние значения температуры стенок выработки и воздуха, подаваемого в выработку;  $F$  — площадь выработки, по которой происходит теплообмен;  $\tau$  — время работы установки.

Интенсивность теплоотдачи горных пород в основном зависит от скорости движения воздуха по выработке и ее геометрических размеров. Чем больше турбулентность потока, тем эффективнее происходит перемешивание воздушных масс и тем интенсивнее идет процесс теплопередачи, в результате этого по сечению выработки температура воздуха практически постоянна [6]. Однако в рассматриваемых условиях имеет место нестационарный тепловой процесс, обусловленный изменением теплосодержания горного массива, окружающего выработки, вследствие его охлаждения. По мере снижения температуры горных пород количество тепла, отдаваемое ими воздуху, будет уменьшаться. С течением времени поэтому изменяется величина температуры стенок выработки, а также и значение коэффициента теплоотдачи. О. А. Кремнев [7] ввел понятие коэффициента нестационарного теплообмена  $k$ , представляющего собой обобщение коэффициента теплообмена для случая нестационарного процесса теплопередачи между горными породами и воздухом. Ввиду сложности полученных решений, определяющих величину коэффициента нестационарного теплообмена при стационарной температуре воздушной среды, разработан критериальный график для вычисления значений  $k$  [7].

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) горными породами выработки воздуху с учетом влияния шероховатости ее стенок определяются уравнением [6]

$$\alpha = 0,02 \varepsilon \frac{\lambda u^{0,8}}{\nu^{0,8} D^{0,2}} = k \varepsilon \frac{u^{0,8}}{D^{0,2}}, \quad (2)$$

где  $u$  — скорость перемещения воздуха по выработке, м/с;  $D$  — диаметр выработки, м;  $\varepsilon$  — коэффициент шероховатости стенок выработки, в зависимости от типа применяемой крепи изменяется от 1 (гладкие стенки) до 3 [7];  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·град;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $k$  — коэффициент.

Численные значения коэффициента  $k = 0,02 \frac{\lambda}{\nu^{0,8}}$  зависят от температуры [8] и могут быть приняты по данным табл. 1.

Для выработки произвольного сечения в формуле (2) принимается ее эквивалентный диаметр, определяемый уравнением  $D_0 = \frac{4S}{\Pi}$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения,  $\Pi$  — периметр выработки.

Определим характер изменения температуры воздуха, прокачиваемого через теплообменник, по длине выработки. Для расчета изменения температуры рудничного воздуха при движении его по выработкам известно решение К. В. Кочнева [9], полученное для условия, что температура горных пород по длине выработки не меняется. При этом значение коэффициента теплоотдачи горными породами предполагается также неизменным и зависимость его от времени проветривания не учитывается. А. Ф. Воропаев [6]

приводит уравнение для расчета температуры воздуха, движущегося по горной выработке, с начальным распределением температуры в горном массиве по глубине по закону геотермического градиента. При этом учитывается наклон выработки и приращение температуры воздуха за счет абсолютных источников тепла (экзотермические и эндотермические процессы, сжатие и расширение воздуха). Более общим является решение Ю. Д. Дядькина [10], в котором учитывается нагрев струи воздуха для любой наклонной выработки за счет тепловыделений горного массива, абсолютных источников тепла и изменения влагосодержания воздуха. При этом изменение  $\alpha$  во времени учитывается значениями коэффициента нестационарного теплообмена  $k_z$ , а изменение температуры горного массива с глубиной принимается по закону геотермического градиента.

Таблица 1

Физические параметры для сухого воздуха

	$t \text{ } ^\circ\text{C}$				
	-40	-20	-0	20	40
$c_p$ кДж/(м <sup>3</sup> ·°C) . . . . .	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13
$\lambda \cdot 10^2$ Вт/(м·°C) . . . . .	2,12	2,28	2,44	2,59	2,76
$\gamma \cdot 10^6$ м <sup>2</sup> /с . . . . .	10,04	11,79	13,28	15,06	16,96
$k$ Дж/(с <sup>0,2</sup> м <sup>2,0</sup> ·°C) . . . . .	4,13	3,99	3,89	3,76	3,62

Однако для слоя гелиотермозоны, где отмечаются годовые колебания температуры горных пород, распределение  $t_n$  по глубине  $z$  существенно отличается от линейного закона. Как показывают результаты производственных геотермических исследований в карьерах [2, 3], в этом случае

$$t_n = t_0 + \gamma_0 z + (\bar{t}_0 - t_0)(1 - e^{-z/H_0}), \quad (3)$$

где  $t_0$  — значение температуры поверхности почвы в рассматриваемый срок,  $\bar{t}_0$  — среднее годовое значение температуры поверхности почвы,  $\gamma_0$  — среднее значение геотермического градиента,  $H_0$  — постоянный коэффициент экспоненты.

Составим дифференциальное уравнение для расчета изменения температуры воздуха, прокачиваемого с поверхности почвы по вертикальной выработке. Для установившегося потока в единицу времени на интервале  $dz$  приращение тепловой энергии за счет теплообмена с горными породами и адиабатического сжатия воздуха составит

$$dQ = k_\tau(t_{zc} - t_z) \Pi dz + W c_p \gamma_a dz, \quad (4)$$

где  $\Pi$  — периметр выработки,  $W$  — расход воздуха,  $c_p$  — удельная объемная теплоемкость воздуха,  $\gamma_a$  — адиабатический градиент,

$t_{zc}$  и  $t_z$  — соответственно температура стенки выработки и воздуха на глубине  $z$ .

Это количество теплоты идет на изменение теплосодержания прокачиваемого воздуха

$$dQ = G[c_p' dt + rd(d_b)], \quad (5)$$

где  $G$  — весовой расход воздуха,  $r$  — удельная теплота парообразования,  $d_b$  — влагосодержание проходящего воздуха,  $c_p$  — удельная весовая теплоемкость сухого воздуха.

Так как  $G = W\gamma_1$ , где  $\gamma_1$  — удельный вес воздуха, то уравнение (5) можно записать, учитывая, что  $c_p' \gamma_1 = c_p$ ,

$$dQ = W[c_p dt + r \gamma_1 d(d_b)]. \quad (6)$$

Если выработка пройдена в сухих породах и испарение влаги со стенок отсутствует, то влагосодержание подаваемого воздуха не изменяется. В этом случае

$$dQ = Wc_p dt. \quad (7)$$

Сравнивая правые части выражений (4) и (7) и обозначая  $\frac{k\tau\Pi}{Wc_p} = \beta$ , получим

$$\frac{dt}{dz} + \beta t = \gamma_a + \beta t_c. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка. Его общий интеграл [11]

$$t = e^{-\int P dz} [\int Q e^{\int P dz} dz + C], \quad (9)$$

где

$$P = \beta, \quad Q = \gamma_a + \beta[t_0 + \gamma_0 z + (\bar{t}_0 - t_0)(1 - e^{-z/H_0})], \quad (10)$$

значение интегрирующего множителя

$$\mu = e^{\int P dz} = e^{\beta z} = e^{\beta z}. \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (9), получим

$$t = e^{-\beta z} [\int e^{\beta z} \beta [t_0 + \gamma_0 z + (\bar{t}_0 - t_0)(1 - e^{-z/H_0})] dz + C_1]. \quad (12)$$

Раскрывая значение интеграла в уравнении (12) и группируя подобные члены, имеем

$$t = C_1 e^{-\beta z} + t_0 + \gamma_0 z - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + (\bar{t}_0 - t_0) \left( 1 + \frac{\beta H_0}{1 - \beta H_0} e^{-z/H_0} \right). \quad (13)$$

Значение постоянной интегрирования определяем из граничных условий: при  $z=0$  (на входе в выработку)  $t=t'$ , где  $t'$  — температура воздуха в рабочей зоне карьера. В этом случае

$$C_1 = t_1 - t_0 + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 - \beta H_0}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), получим окончательно аналитическое выражение для расчета изменения температуры воздуха, перемещаемого через вертикальную выработку:

$$t = t_0 + \gamma_0 z - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + (\bar{t}_0 - t_0) \left( 1 + \frac{\beta H_0}{1 - \beta H_0} e^{-z/H_0} \right) + \\ + \left( t' - t_0 + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 - \beta H_0} \right) e^{-\beta z}. \quad (15)$$

Значение температуры воздуха на глубине  $z=H$  определится выражением

$$t_1 = t_0 + \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + (\bar{t}_0 - t_0) \left( 1 + \frac{\beta H_0}{1 - \beta H_0} e^{-H/H_0} \right) + \\ + \left( t' - t_0 + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 - \beta H_0} \right) e^{-\beta H}. \quad (16)$$

При  $\bar{t}_0 - t_0 = 0$  полученное решение (16) совпадает с формулами Ю. Д. Дядькина и А. Ф. Воропаева.

Для горизонтальной выработки длиной  $L$ , расположенной на глубине  $H$ , баланс тепла при перемещении на  $dl$  составит

$$W c_p dt = k_\tau \Pi (t_c - t) dl. \quad (17)$$

Если температура стенок выработки не меняется по длине:

$$t_c = t_0 + \gamma_0 H + (\bar{t}_0 - t_0)(1 - e^{-H/H_0}), \quad (18)$$

то дифференциальное уравнение изменения температуры воздуха будет иметь вид

$$\frac{dt}{t_c - t} = \beta dl, \quad (19)$$

интегрируя которое, получим

$$\ln(t_c - t) = -\beta l + C_2. \quad (20)$$

Постоянную интегрирования определяем из начальных условий: при  $l=0$   $t=t_1$ , откуда

$$C_2 = \ln(t_c - t_1). \quad (21)$$

Окончательно выражение изменения температуры воздуха в горизонтальной выработке длиной  $L$  принимает вид

$$t = t_c - (t_c - t_1) \exp(-\beta L). \quad (22)$$

При выдаче нагретого в горизонтальной выработке воздуха через вертикальную выработку часть энергии будет расходоваться на теплообмен с горными породами. Аналогично рассмотренным выше условиям для вертикальной выработки определим характер изменения температуры воздуха. Так как поток воздуха направлен против положительного направления оси  $oz$ , то количество теплоты, переданное воздуху за счет теплообмена с горными породами и адиабатического расширения его на интервале  $(-dz)$ , составит

$$dQ = [k \cdot \Pi(t_c - t) - Wc_p \gamma_a](-dz) = Wc_p dt. \quad (23)$$

Отсюда дифференциальное уравнение изменения температуры воздуха в выдающей выработке

$$\frac{dt}{dz} - \beta t = \gamma_a - \beta t_c, \quad (24)$$

где значение  $t_c$  определяется уравнением (3). Решение (24) имеет вид

$$t = C_3 e^{\beta z} + t_0 + \gamma_0 z + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + (\bar{t}_0 - t_0) \left(1 - \frac{\beta H_0}{1 + \beta H_0} e^{-z/H_0}\right), \quad (25)$$

при  $z=H$   $t=t_2$ , откуда определяем  $C_3$ :

$$C_3 = \left[ t_2 - t_0 - \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - (\bar{t}_0 - t_0) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{\beta H_0}{1 + \beta H_0} e^{-H/H_0}\right) \right] e^{-\beta H}. \quad (26)$$

Подставляя (26) в (25), получим аналитическое выражение для расчета изменения температуры воздуха при его движении через вертикальную выработку в карьерное пространство:

$$t = t_0 + \gamma_0 z + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + (\bar{t}_0 - t_0) \left(1 - \frac{\beta H_0}{1 + \beta H_0} e^{-z/H_0}\right) + \\ + \left[ t_2 - t_0 - \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - (\bar{t}_0 - t_0) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{\beta H_0}{1 + \beta H_0} e^{-H/H_0}\right) \right] e^{\beta(z-H)}. \quad (27)$$

На выходе из выработки в карьер температура воздуха при  $z=0$  определится выражением

$$t = t_0 + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 + \beta H_0} + \left[ t_2 - t_0 - \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - \right. \\ \left. - (\bar{t}_0 - t_0) \left(1 - \frac{\beta H_0}{1 + \beta H_0} e^{-H/H_0}\right) \right] e^{-\beta H}. \quad (28)$$

Следует отметить, что выражение (28) может быть получено также непосредственно из уравнения (16), трансформированного для обратного теплового расчета, когда по известному значению  $t_1$  вычисляется  $t'$ . Действительно, решая (16) относительно  $t'$ , получим

$$t' = t_0 - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} + \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 + \beta H_0} + \left[ t_1 - t_0 - \gamma_0 H + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} - (\bar{t}_0 - t_0) \left( 1 + \frac{\beta H_0}{1 - \beta H_0} e^{-H/H_0} \right) \right] e^{\beta H}. \quad (29)$$

Это выражение применимо и для расчета температуры воздуха, подаваемого из теплообменника в карьерное пространство, но так как в выдающей выработке направление воздушного потока противоположно оси  $oz$ , то в уравнении (29) необходимо заменить значение  $\beta = -\beta_1$ , где  $\beta = k_z \Pi / W c_p$ . Отсюда, заменяя соответственно  $t'$  на  $t$  и  $t_1$  на  $t_2$ , получим

$$t = t_0 + \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta_1} + \frac{\bar{t}_0 - t_0}{1 + \beta_1 H_0} + \left[ t_2 - t_0 - \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta_1} - (\bar{t}_0 - t_0) \left( 1 - \frac{\beta_1 H_0}{1 + \beta_1 H_0} e^{-H/H_0} \right) \right] e^{-\beta_1 H}, \quad (30)$$

что полностью совпадает с выражением (28).

Таким образом, последовательно используя уравнения (16), (22) и (28), можно рассчитать изменение температуры воздуха, прокачиваемого через выработку — теплообменник.

Пусть в пределах карьерного пространства на высоту  $h$  от дна установилась инверсия с изменением температуры  $dt/dz = \gamma$ . Температурное содержание воздуха определяется выражением

$$I = c_p V T, \quad (31)$$

где  $V$  — объем,  $T$  — температура воздуха, К.

Выражение (31) в дифференциальной форме имеет вид

$$dI = c_p (T dV + V dT). \quad (32)$$

Изменение температуры по глубине

$$T = T_0 + \gamma z. \quad (33)$$

Рассматривая объем воздуха в зоне инверсии как объем эквивалентного усеченного кругового конуса, получим

$$V_H = \pi z (R_0^2 - R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{z^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \beta_k), \quad (34)$$

где  $R_0$  — радиус основания конуса на уровне границы зоны инверсии;  $\beta_k$  — среднее значение угла наклона борта.

Дифференцируя (33) и (34), получим

$$dV = \pi (R_0^2 - 2R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_k) dz, \quad (35)$$

$$dT = \gamma dz. \quad (36)$$

Подставляя (35) и (36) в (32), получим

$$dl = c_p [\pi (T_0 + \gamma z) (R_0^2 - 2R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_k) dz + \pi \gamma z (R_0^2 - R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{z^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \beta_k) dz], \quad (37)$$

интегрируя которое получим выражение для определения общего теплосодержания воздуха в карьере

$$I = c_p \pi \int_0^h [(T_0 + \gamma z) (R_0^2 - 2R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_k) + \gamma z (R_0^2 - R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{z^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \beta_k)] dz. \quad (38)$$

Для равновесного распределения температуры ( $\gamma_p = 0,006^\circ\text{C}/\text{м}$ ), являющегося граничным условием устойчивого состояния атмосферы,

$$I_p = c_p \pi \int_0^h [(T_0 + \gamma_p z) (R_0^2 - 2R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + z^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_k) + \gamma_p z (R_0^2 - R_0 z \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{z^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \beta_k)] dz. \quad (39)$$

Дефицит тепловой энергии в карьере

$$\Delta I = I_p - I = c_p \pi \int_0^h (\gamma_p - \gamma) \left( 2R_0^2 z - 3R_0 z^2 \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{4}{3} z^3 \operatorname{ctg}^2 \beta_k \right) dz. \quad (40)$$

Принимая значение  $\gamma = \text{const}$ , получим формулу для подсчета дефицита тепловой энергии в карьере при инверсии высотой  $h$ :

$$\Delta I = \pi c_p h^2 (\gamma_p - \gamma) \left( R_0^2 - R_0 h \operatorname{ctg} \beta_k + \frac{h^2}{3} \operatorname{ctg}^2 \beta_k \right). \quad (41)$$

Для количественной оценки возможности использования тепловой энергии горных пород рассмотрим пример. Пусть на нижнем горизонте карьера проведена замкнутая выработка-скважина на глубину  $H = 20$  м диаметром  $D = 1$  м и горизонтальной длиной  $L = 30$  м. С помощью вентилятора из рабочей зоны через нее со скоростью  $u = 5$  м/с прокачивается воздух, имеющий температуру  $t' = -12,5^\circ\text{C}$ , температура стенок выработки по глубине определяется по уравнению (3), при этом  $t_0 = -5,1^\circ\text{C}$ ;  $\bar{t} = 12,9^\circ\text{C}$ ;  $\gamma_0 = 0,03^\circ\text{C}/\text{м}$ ;  $H_0 = 2,4$  м;  $c_p = 1,3 \cdot 10^3$  Дж/(м $\cdot$ °C); коэффициент теплопроводности почвы  $\lambda = 1,6$  Вт/(м $\cdot$ °C); коэффициент температуропроводности  $a = 5,5 \cdot 10^{-7}$  м $^2$ /с.

Расчетом определяем: периметр выработки  $H = \pi D = 3,14$  м; расход воздуха  $W = \frac{\pi}{4} D^2 u = 3,93$  м $^3$ /с; коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 3,94 \frac{u^{0,8}}{D^{0,2}} = 14,2$  Вт/(м $^2$ ·°C); значение параметра  $\rho = \alpha R / \lambda = 4,45$ ;

при суммарном времени работы теплообменника около 30 ч ( $\tau_1 = 1,08 \cdot 10^5$  с) значение параметра  $\varphi = a\tau_1/R^2 = 0,24$ . По критериальному графику [7] с учетом  $\rho$  и  $\varphi$  определяем  $K_{u\tau} = k_\tau R/\lambda = 1,45$ , откуда коэффициент нестационарного теплообмена  $k_\tau = 4,65$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Значение параметра  $\beta = k_\tau \Pi/Wc_p = 2,87 \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup>;  $\beta H = 0,0575$ ;  $\beta H_0 = 6,9 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta L = 0,086$ ;  $e^{-\beta H} = 0,947$ ;  $e^{-\beta H_0} = 0,920$ ;  $e^{-\beta H_0} = 0,0024$ ;  $\gamma_0 H = 0,6^\circ\text{C}$ ;  $\frac{\gamma_0 - \gamma_a}{\beta} = 7,0^\circ\text{C}$ . Температура горных пород на глубине  $z = 20$  м по формуле (3)

$$t_c = -5,1 + 0,6 + [12,9 - (-5,1)](1 - 0,00024) = 13,5^\circ\text{C}.$$

Определяем далее по формулам (16), (22) и (28) значения температуры воздуха:

$$t_1 = -5,1 + 0,6 - 7,0 + [12,9 - (-5,1)] \left( 1 + \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{1 - 6,9 \cdot 10^{-3}} 0,00024 \right) +$$

$$+ \left[ (-5,9) - (-5,1) + 7,0 - \frac{12,9 - (-5,1)}{1 - 6,9 \cdot 10^{-3}} \right] 0,947 = -11,0^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 13,5 - [13,5 - (-11,0)] 0,920 = -9,1^\circ\text{C};$$

$$t = -5,1 + 7,0 + \frac{12,9 - (-5,1)}{1 + 6,9 \cdot 10^{-3}} + \left\{ (-9,1) - (-5,1) - 0,6 - 7,0 - \right.$$

$$\left. - [12,9 - (-5,1)] \left( 1 - \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{1 + 6,9 \cdot 10^{-3}} 0,00024 \right) \right\} 0,947 = -8,1^\circ\text{C}.$$

Таким образом, в подающей вертикальной транспортной выработке нагрев воздуха составил  $\Delta t_1 = t_1 - t' = (-11,0) - (-12,5) = 1,5^\circ\text{C}$ ; в горизонтальной выработке  $\Delta t_2 = t_2 - t_1 = (-9,1) - (-11,0) = 1,9^\circ\text{C}$ ; в выдающей выработке  $\Delta t_3 = t - t_2 = (-8,1) - (-9,1) = 1,0^\circ\text{C}$ . Суммарный нагрев воздуха

$$\Delta t = t - t' = (-8,1) - (-12,5) = 4,4^\circ\text{C}.$$

Производительность установки по теплу составляет

$$Q' = Wc_p \Delta t = 3,93 \cdot 1,3 \cdot 10^3 \cdot 4,4 = 2,24 \cdot 10^4 \text{ Дж/с}.$$

Если в карьере установилась инверсия с градиентом  $\gamma = -0,01^\circ\text{C/м}$  до высоты  $h = 50$  м,  $R_0 = 70$  м и  $\beta_k = 45^\circ$ , то по уравнению (41) дефицит тепловой энергии при этом составляет

$$\Delta I = \pi \cdot 1,3 \cdot 10^3 \cdot 50^2 [0,006 - (-0,01)] \left( 70^2 - 70 \cdot 50 \cdot 1,0 + \right. \\ \left. + \frac{50^2}{3} \cdot 1 \right) = 3,6 \cdot 10^8 \text{ Дж}.$$

Время работы установки из трех аналогичных выработок до установления равновесного распределения температуры в карьере

$$\tau = \frac{\Delta I}{nQ'} = \frac{3,6 \cdot 10^8}{3 \cdot 2,24 \cdot 10^4} = 5,4 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 1,5 \text{ ч}.$$

Таким образом, за счет низкотемпературного нагрева от естественного теплового источника — геотермальных ресурсов почвы

карьерного пространства, представляется возможным повышение теплосодержания воздуха, что ведет к перестройке температурного профиля в карьере. При этом нет какого-либо топлива и отсутствуют агрегаты для его сжигания, транспортировки, хранения и т. п.; нет выделений газов и других вредностей; отсутствуют непроизводительные потери тепловой энергии; при эксплуатации обеспечивается высокая степень безопасности, а процесс включения в работу побудителя тяги может быть автоматизирован. В качестве контролирующего прибора можно рекомендовать применение в карьерах термоградиентографа [12], работающего автоматически по заданной циклограмме. Для снижения влияния естественной конвекции по глубине выработок в них необходимо предусматривать изолирующие устройства, а также полностью закрывать входные и выходные отверстия скважин-теплообменников. Для повышения теплопроизводительности установки целесообразно проведение нескольких рядом расположенных выработок. В летний период такие теплообменники являются аккумуляторами тепловой энергии от нагретого воздуха с последующим использованием ее в зимний период года для предупреждения возникновения или разрушения сформировавшейся инверсии в карьере.

Весьма перспективным является использование таких теплообменников в глубоких карьерах при мощных инверсиях в сочетании с механическими установками естественного проветривания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидин Г. Д. Условия, приводящие к загазованию Коркинского угольного карьера.— В кн.: Проблемы борьбы с рудничными газами и пылью. М., «Наука», 1969, с. 68—79.
2. Иванов И. И. О геотермических исследованиях в карьерах.— «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 73—84.
3. Иванов И. И. Исследование геотермического режима карьеров.— В кн.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 25—35.
4. Дядькин Ю. Д. Проблемы теплофизики в горной промышленности Севера.— В кн.: Вопросы горного дела. М., «Недра», 1967, с. 84—104.
5. Дядькин Ю. Д. и др. Перспективы использования тепла Земли в технологических процессах горнопромышленного производства.— «Колыма», 1969, № 5, с. 3—6.
6. Воропаев А. Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. М., Госгортехиздат, 1961, 248 с.
7. Шербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Киев, Изд-во АН УССР, 1959, 430 с.
8. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М., «Высшая школа», 1965, 396 с.
9. Кочнев К. В. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха. М., Изд-во АН СССР, 1960, 136 с.
10. Дядькин Ю. Д. О методах тепловых расчетов рудничного воздуха.— В кн.: Научные доклады высшей школы. Горное дело, 1958, № 1, с. 115—125.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., «Наука», 1970, 720 с.
12. Иванов И. И., Хирви В. А. Термоградиентограф для производственных наблюдений в карьерах.— «Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых», 1971, № 5, с. 89—95.

С. И. ЗЕНОВ, Ф. А. ЧЕМИНАВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ИНВЕРСИЙ В КАРЬЕРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ИСКУССТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Наличие инверсии является, как правило, определяющим фактором, обуславливающим накопление вредной примеси в атмосфере карьера. Поэтому задачу искусственной вентиляции часто связывают с разрушением внутрикарьерной инверсии [1, 2].

Эта взаимосвязь подсказывает принципиальную возможность косвенной оценки схем искусственного проветривания и выбора наиболее оптимальной из них путем измерения меняющихся в ходе искусственного воздухообмена метеорологических параметров и определения степени полноты разрушения инверсии. С другой стороны, изучение процессов разрушения инверсий имеет большое значение для технологии проветривания, так как характер и мощность инверсии существенно влияют на эффективность проветривания.

Экспериментальные исследования разрушения инверсий в карьере при различных схемах искусственного проветривания, проведенные нами на юго-восточном участке карьера Аксай с октября 1972 г. по август 1973 г., преследовали следующие основные цели:

- изучение динамики изменения состояний атмосферы карьера при периодическом искусственном проветривании;
- экспериментальное подтверждение теории разрушения инверсий в карьере при искусственном проветривании;
- обоснование и выбор наиболее оптимальной схемы искусственного проветривания карьера.

Техническое оснащение экспериментов составили шесть передвижных вентиляторных установок, использующих шахтные осевые вентиляторы типа «Проходка-500». Две установки были спаренными, а четыре — одинарными. Характеристики установок представлены в табл. 1.

Общий вид экспериментальной спаренной установки проветривания представлен на рис. 1.

Все установки имели общий питающий кабель с ответвлениями и могли запускаться одновременно или раздельно через свои пускатели.

Основными приборами, регистрирующими состояние атмосферы карьера, явились приборы вертикального зондирования атмосферы карьера, подробное описание которых дано в [3]. Дополнительно измерялась температура подаваемого воздуха с помощью

Таблица 1  
Технические данные установок проветривания

Параметр	Установка	
	одинарная	спаренная
Диаметр выходного сопла, м . . . . .	0,5	0,5
Скорость струи на выходе из сопла, м/с	21	30
Угол наклона струи, град. . . . .	0—45	0—45
Мощность привода, кВт . . . . .	1×4,5	2×4,5
Габариты, мм:		
длина . . . . .	3300	4500
ширина . . . . .	1400	2100
высота . . . . .	2000	2000

аспирационного психрометра, температура поверхности почвы и воздуха на высоте 2 м на дне карьера. Опыты проводились при скорости ветра на поверхности менее 1 м/с и устойчивой стратификации атмосферы, что контролировалось приборами.

Программой предусматривалось исследование параметров двух принципиально возможных схем:

схема I — верхнее параллельное положение вентиляторных агрегатов с подачей струй вниз;

схема II — нижнее последовательное положение вентиляторных агрегатов с подачей струй вдоль длинной оси карьера.

На рис. 2 а, б изображены процессы изменения стратификации атмосферы в карьере при искусственном проветривании, полученные во время одного из опытов.

Характерным для всех опытов и в этих опытах, в частности, является полное разрушение инверсии в процессе проветривания и относительно быстрое ее восстановление после прекращения проветривания. Разрушение инверсии при проветривании по схеме I происходит по всей глубине карьера, кроме небольших придонных участков, где сохраняется слабая инверсия, обусловленная процессами радиационного выхолаживания, которое вызвано отрицательным радиационным балансом горных пород в период проведения опытов. Именно от придонных участков и происходит восстановление инверсии в карьере.

Экспериментальные данные совпадают с известными теоретическими зависимостями [2], что можно показать на следующем примере. На рис. 2 в показан результат опыта, проведенного 20 марта 1973 г., в котором инверсия сохранилась после 20 мин проветривания.

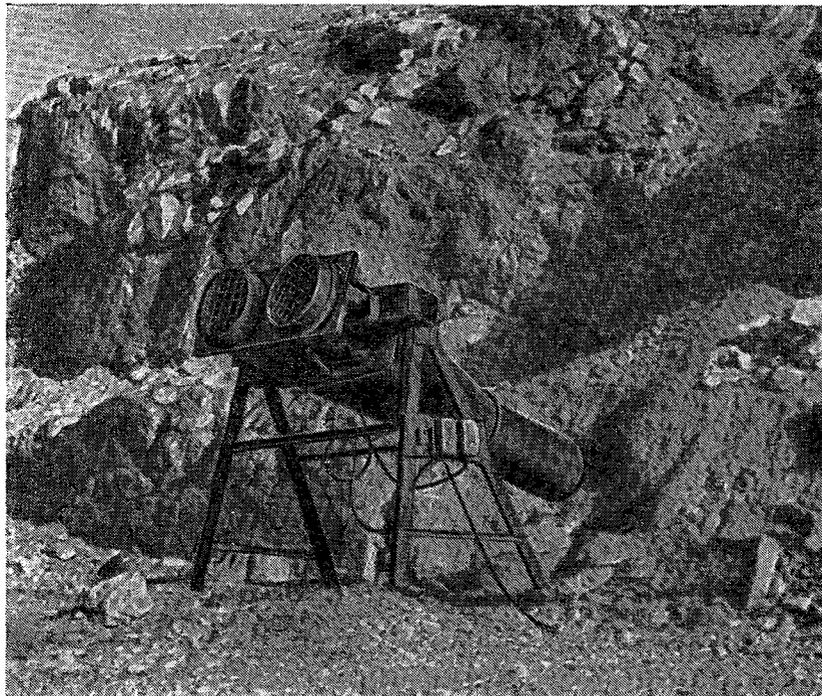


Рис. 1. Экспериментальная спаренная установка искусственного проветривания карьера.

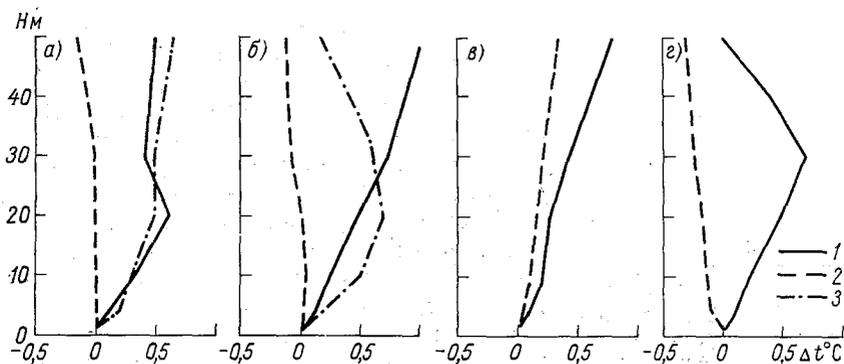


Рис. 2. Изменение температурной стратификации атмосферы карьера в процессе искусственного проветривания по схеме I.  
 1 — перед проветриванием, 2 — состояние атмосферы на конец проветривания, 3 — состояние атмосферы через 20 мин после проветривания.

Время, необходимое для разрушения инверсии, определяется по формуле [2]

$$\tau = \frac{\psi \frac{V(t_0 - t_n + \gamma_a H)}{2,18 \eta q_0 \left( \frac{aL}{R_0} + 0,29 \right)}}{t_0 + \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + a' \gamma_a H - t_n} \quad (1)$$

Значения коэффициентов уравнения (1) следующие:

$$a' = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{q_0}{q_n} \right); \quad \psi = 1 + \frac{V_n}{V};$$

$$\eta = \frac{1-p}{2} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{H_n}{H} \right). \quad (2)$$

Здесь  $H$  — глубина карьера (высота установки вентилятора), м;  $H_n$  — высота инверсионного слоя, м;  $V$  — объем проветриваемой зоны карьера, м<sup>3</sup>;  $V_n$  — объем зоны инверсии, м<sup>3</sup>;  $t_0$  — температура воздуха на поверхности, °С;  $t_n$  — температура воздуха на дне карьера, °С;  $q_0$  — начальный расход воздуха в струе, м<sup>3</sup>/с;  $q_n$  — расход воздуха в струе на дне карьера, м<sup>3</sup>/с;  $p = H/L_n$  — относительная глубина карьера;  $L_n$  — средний размер карьерного пространства по поверхности, м;  $\gamma_a$  — сухоадиабатический градиент, °С/м;  $t_i$  — температура воздуха в  $i$ -том слое карьера, °С;  $a$  — коэффициент структуры струи;  $L$  — расстояние до рассматриваемого сечения струи, м;  $R_0$  — начальный радиус струи, м.

В нашем случае, при  $H=40$  м,  $V=2,03 \times 10^5$  м<sup>3</sup>,  $t_0=1,8$ °С,  $t_n=0,8$ °С,  $q_0=24,4$  м<sup>3</sup>/с,  $q_n=676$  м<sup>3</sup>/с,  $\Psi=2$ ,  $\eta=0,21$ , время разрушения инверсии, рассчитанное по формуле, составляет 132 мин. В примере, изображенном на рис. 2 г, теоретическое время разрушения инверсии составляет 22 мин, поэтому при 20 мин проветривания инверсия в карьере была полностью разрушена.

Экспериментальные исследования искусственного проветривания по схеме II — нижнее последовательное положение средств вентиляции, имело своей целью проверку ее эффективности, как одну из возможных [4] для рассматриваемых условий.

Типичный результат проветривания карьера по схеме II представлен на рис. 3. Можно выделить две зоны: нижний 20-

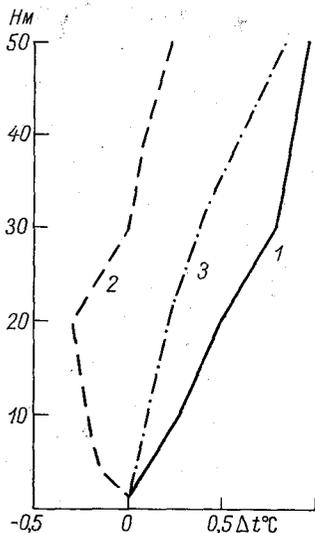


Рис. 3. Изменение температурной стратификации атмосферы карьера в процессе искусственного проветривания по схеме II.

1 — перед проветриванием,  
2 — после проветривания,  
3 — через 20 мин после проветривания.

метровый слой, в котором инверсия разрушается полностью, и верхний слой, в котором инверсия сохраняется.

Таким образом, если по схеме I достигается разрушение инверсии по всей глубине карьера, то при использовании схемы II инверсия разрушается лишь в нижней области. Это убедительно доказывает целесообразность применения верхнего положения вентиляторных агрегатов по отношению к проветриваемой зоне.

Наличие в придонной области остаточной инверсионной зоны, вызванной выхолаживанием горных пород, подсказывает необходимость взаимодействия средств общекарьерного и местного проветривания. При этом средства местного проветривания или вентилятор общекарьерного проветривания, работающий в режиме местной вентиляции, смогут разрушать зарождающуюся внутрикарьерную инверсию и разбавлять вредные примеси в больших объемах в пределах карьерного пространства. Средства общекарьерного проветривания включаются уже в том случае, когда концентрация вредных газов у рабочих мест достаточно близка к предельно допустимой при работающих установках местного проветривания.

Значительная скорость восстановления инверсии показывает не только необходимость циклического проветривания, но и то, что время переходного процесса между периодами проветривания может быть достаточно мало, что определяется характером и мощностью инверсии, синоптической обстановкой и другими факторами, влияющими на скорость восстановления инверсии и естественный воздухообмен в карьере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов С. С., Михайлов В. А., Вершинин А. А. Борьба с пылью и газами на карьерах. М., «Недра», 1973. 144 с.
2. Битколов Н. З., Иванов И. И. Теоретические основы процесса разрушения инверсий в карьерах.— «Гр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 86—94.
3. Иванов И. И., Хирви В. А. Приборы вертикального зондирования атмосферы карьеров.— «Гр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 97—109.
4. Филатов С. С. Исследование способов и разработка средств искусственной вентиляции карьеров.— Автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М., МГИ, 1974. 38 с.

## К РАСЧЕТУ ИСКУССТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН В КАРЬЕРАХ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИМИ СТРУЯМИ

В комплексе средств искусственного проветривания карьеров наряду с вентиляторами, создающими горизонтальные и наклонные струи, с ростом глубины карьеров все более целесообразными становятся установки, создающие вертикальные восходящие вентиляционные струи. Выполняя роль воздухоподающих стволов, такие струи позволяют выносить образующиеся в карьере вредные примеси на значительную высоту, обеспечивая одновременно в ходе подъема их эффективное разжижение. В качестве средств создания восходящих вентиляционных потоков могут использоваться различные тепловые и динамические источники: теплотроны [1], газодинамические установки [2] и специальные вентиляторы, создающие чисто динамические струи [3].

По удельным энергетическим затратам лучшие показатели имеют вентиляторы, создающие изотермические струи с возможно большим начальным расходом и минимальной (но достаточной для подъема струи на заданную высоту) начальной скоростью [4].

Из имеющихся технических средств этим требованиям в наибольшей степени отвечают вентиляторные агрегаты, созданные на базе несущих винтов вертолетов. Опыт промышленной эксплуатации агрегатов АВК-3, созданных на базе несущего винта вертолета МИ-1А, свидетельствует о их достаточно высокой эффективности в карьерах глубиной до 100—120 м и возможности длительной работы в периоды штилей [5].

В настоящее время в стадии рабочего проектирования находится вентилятор АВК-4, который позволит проветривать карьеры и застойные зоны глубиной до 250—300 м. Винт вентилятора приводится во вращение специальным электродвигателем вертикального исполнения. Установка смонтирована на трайлерном прицепе грузоподъемностью 40 т.

Ниже приводятся технические данные вентилятора АВК-4 и электродвигателя:

Диаметр винта, м . . . . .	21
Число лопастей . . . . .	4
Начальный расход воздуха, м <sup>3</sup> /с . . . . .	2520
Практическая дальнобой- ность струи, м . . . . .	280
Тип электродвигателя . . .	асинхронный
Номинальная мощность, кВт	1000
Номинальное число оборо- тов, об/мин . . . . .	187
Вес, т . . . . .	20

Общий вид карьерного вентилятора АВК-4 показан на рис. 1. В связи с предстоящим широким внедрением таких установок приобрели актуальность вопросы расчета проветривания карьеров вертикальными струями.

Важным при расчете и проектировании систем вентиляции является определение времени проветривания застойных зон. Этот вопрос решается достаточно просто при постоянных величинах проветриваемых объемов и расходов воздуха. При струйном способе определение времени проветривания осложняется из-за переменного расхода воздуха по длине струи и изменяющегося в процессе проветривания объема загрязненной зоны.

Рассмотрим проветривание загрязненной зоны в круглом (в плане) карьере одной вертикальной струей при полном штиле и устойчивой стратификации атмосферы (рис. 2). В этом случае при отсутствии естественного воздухообмена вредные примеси, выделяющиеся в нижней части карьера, постепенно заполняют карьерное пространство. Обычно при этом наблюдается достаточно четкая граница загрязненной зоны.

При проветривании карьера загрязненный воздух постепенно выносится вертикальной струей из застойной зоны и рассеивается в атмосфере. Уровень загрязнения в процессе проветривания постепенно понижается до полной ликвидации застойной зоны. Расход загрязненного воздуха в струе в процессе проветривания уменьшается. Процесс проветривания загрязненного объема описывается дифференциальным уравнением

$$dV = -Qdt, \quad (1)$$

где  $V$  — объем загрязненной зоны, м<sup>3</sup>;  $Q$  — расход воздуха в струе на границе зоны загрязнения, м<sup>3</sup>/с;  $t$  — время проветривания, с.

Для интегрирования уравнения необходимо связать  $V$  и  $Q$  с переменной высотой зоны загрязнения  $z$ . Переменная  $V$  может

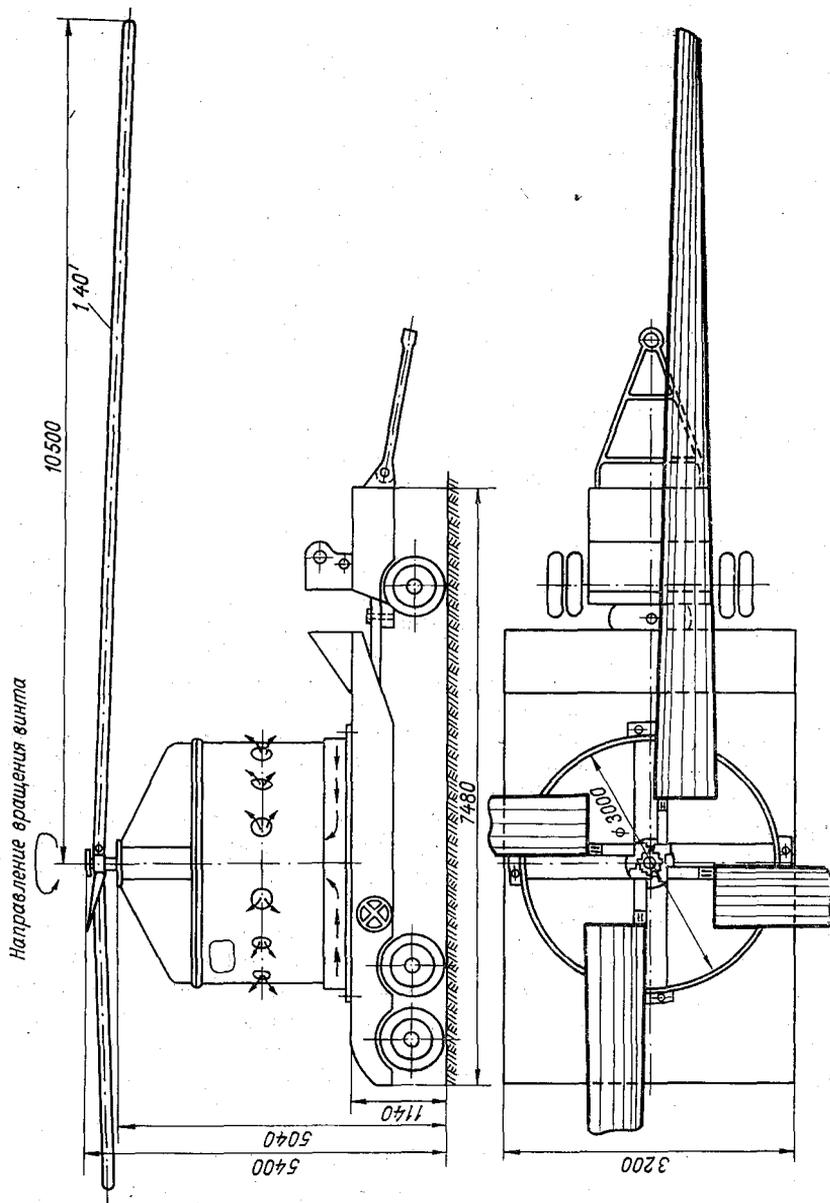


Рис. 1. Общий вид карьерного вентилятора АВК-4.

быть представлена как объем усеченного конуса высотой  $z$  с основанием  $R$  и  $r$  (рис. 2):

$$V = \frac{\pi z}{3} (R^2 + r^2 + Rr) = \frac{\pi}{3} (3r^2 z + 3rz^2 \operatorname{ctg} \alpha + z^3 \operatorname{ctg}^2 \alpha). \quad (2)$$

Изменение расхода по длине свободной турбулентной струи подчиняется известной зависимости [6]

$$Q = 4,36 Q_0 \left( \frac{az}{D_0} + 0,145 \right). \quad (3)$$

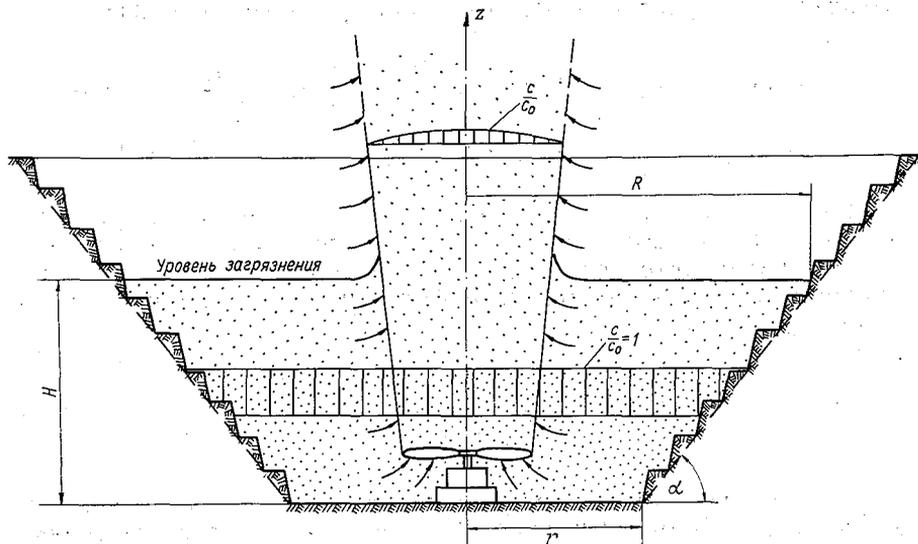


Рис. 2. Схема проветривания загрязненной зоны в карьере вертикальной струей.

Подставляем значения  $V$  и  $Q$  в уравнение (1) и интегрируем его по  $z$  и  $t$ :

$$\frac{\pi}{3} d(3r^2 z + 3rz^2 \operatorname{ctg} \alpha + z^3 \operatorname{ctg}^2 \alpha) = -4,36 Q_0 \left( \frac{az}{D_0} + 0,145 \right) dt;$$

$$\int_0^H \frac{(r^2 + 2r \operatorname{ctg} \alpha z + \operatorname{ctg}^2 \alpha z^2) dz}{\frac{az}{D_0} + 0,145} = -\frac{4,36}{\pi} Q_0 \int_0^t dt, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус дна карьера, м;  $\alpha$  — угол наклона борта, м;  $H$  — начальная высота уровня загрязнения, м;  $D_0$  — диаметр вента вентиляторной установки, м;  $Q_0$  — начальный расход воздуха в струе, м<sup>3</sup>/с;  $a$  — коэффициент турбулентной структуры;

$$r^2 \frac{D_0}{a} \left[ \ln 0,145 - \ln \left( \frac{aH}{D_0} + 0,145 \right) \right] + 2r \operatorname{ctg} \alpha \left[ -\frac{0,145 D_0^2}{a^2} \ln 0,145 - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{D_0}{a} H + \frac{0,145 D_0^2}{a^2} \ln\left(\frac{aH}{D_0} + 0,145\right) \Big] + \operatorname{ctg}^2 \alpha \left(\frac{D_0}{a}\right)^3 \left[\frac{0,145^2}{2} - 2 \cdot 0,145^2 + \right. \\
 & \quad \left. + 0,145^2 \ln 0,145 - \frac{1}{2} \left(\frac{aH}{D_0} + 0,145\right)^2 + 0,29 \left(\frac{aH}{D_0} + 0,145\right) - \right. \\
 & \quad \left. - 0,145^2 \ln\left(\frac{aH}{D_0} + 0,145\right)\right] = \frac{-4,36}{\pi} Q_0 t. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Опуская промежуточные преобразования, получаем уравнение, выражающее зависимость времени проветривания от высоты зоны загрязнения с учетом параметров карьера и вентиляторной установки:

$$\begin{aligned}
 & \left[ r^2 - 0,29 r \operatorname{ctg} \alpha \frac{D_0}{a} - 0,021 \operatorname{ctg}^2 \alpha \left(\frac{D_0}{a}\right)^2 \right] \ln\left(\frac{aH}{0,145 D_0} + 1\right) + \\
 & \quad + 2r \operatorname{ctg} \alpha H + \operatorname{ctg} \alpha \frac{D_0}{2a} H \left(\frac{a}{D_0} H - 0,0725\right) = 1,39 Q_0 \frac{a}{D_0} t. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Ввиду различного порядка слагаемых в левой части уравнения (3) оно может быть значительно упрощено путем отбрасывания членов, являющихся величинами меньшего порядка. После упрощения получаем приближенную формулу для времени проветривания застойной зоны

$$t = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha H^2 + 4r \operatorname{ctg} \alpha H + 2r^2 \ln\left(\frac{aH}{0,145 D_0} + 1\right)}{2,77 \frac{a}{D_0} Q_0}. \quad (7)$$

Наибольшая относительная ошибка результатов, получаемых по формуле (7), не превышает 1,5% по сравнению с значениями, найденными по уравнению (6).

Определенное по формуле (7) время проветривания вентилятором АВК-4 застойной зоны объемом  $V=58,7$  млн.  $\text{м}^3$  в карьере с параметрами  $H=200$  м,  $\alpha=45^\circ$  и  $r=200$  м составляет 164 мин.

Если рассчитывать процесс проветривания этой зоны, полагая, что количество выносимого струей воздуха равно начальной производительности вентилятора, как это предлагается в некоторых работах, то время проветривания составит

$$t = \frac{V}{Q_0} = \frac{587 \cdot 165}{2520} = 23\,290 \text{ с} = 388 \text{ мин},$$

т. е. в 2,3 раза больше, чем по предлагаемой методике.

Из сравнения полученных результатов следует, что оценка вертикальных струй без учета изменяющегося в процессе проветривания расхода на границе уровня загрязнения приводит к недопустимым ошибкам.

Непосредственное отношение к проветриванию застойной зоны вертикальной струей имеет вопрос о концентрации вредных примесей в воздухе, выносимом из карьера. Поскольку загрязненный воздух может затем оседать на жилые поселки и промышленные

сооружения, расположенные вблизи карьера, необходимо стремиться к тому, чтобы средняя концентрация на пределе дальности струи не превышала допустимую.

Концентрация примесей в струе за пределами загрязненной зоны будет уменьшаться по длине струи за счет эжекции чистого воздуха и изменяться во времени вследствие уменьшения начального уровня загрязнения. Имеющиеся решения для концентрации примесей в струе, выведенные для стационарных условий [6], для рассматриваемого случая непригодны.

Средняя за время  $t$  концентрация на предельной дальности струи может быть найдена из выражения

$$\bar{c} = \frac{\int_0^t c dt}{t}, \quad (8)$$

где  $c$  — концентрация в рассматриваемом сечении струи в произвольный момент времени.

Выражение (8) не может быть непосредственно проинтегрировано, так как неизвестна функция  $c(t)$ , поэтому выразим  $c$  и  $t$  через переменную  $H$ . Для этого рассмотрим процесс изменения концентрации в загрязненной зоне и в струе выше и ниже уровня  $H$ .

При  $z > H$  концентрация примесей в струе и окружающем воздухе постоянна и не изменяется в процессе проветривания.

При  $z \leq H$  начнется формирование характерного для струй профиля концентраций, с максимумом на оси, а в произвольном поперечном сечении струи вследствие постоянного количества примеси  $q$  будет выполняться условие  $q = cQ = c_0 Q_H = \text{const}$  (рис. 2) ( $Q_H$  — расход в струе на границе уровня загрязнения).

Подставляя сюда значения расходов воздуха, по формуле (2) находим

$$c \cdot 4,36 Q_0 \left( \frac{az}{D_0} + 0,145 \right) = c_0 \cdot 4,36 Q_0 \left( \frac{aH}{D_0} + 0,145 \right),$$

$$c = c_0 \frac{aH + 0,145 D_0}{az + 0,145 D_0}. \quad (9)$$

Подставляя (7) и (8) в (9), получим после преобразований

$$\bar{c} = \frac{c_0 \left\{ \frac{2}{3} a \text{ctg}^2 \alpha H^3 + (2ra \text{ctg} \alpha + 0,145 D_0 \text{ctg}^2 \alpha) H^2 + 0,58 D_0 \text{ctg} \alpha H + \right.}{\text{ctg}^2 \alpha H^2 + 4r \text{ctg} \alpha H +}$$

$$+ 0,29 D_0 r^2 \left[ \int_0^H \frac{\left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right)} d \left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right) - \int_0^H \frac{d \left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right)} \right]$$

$$\left. + 2r^2 \ln \left( \frac{aH}{0,145 D_0} + 1 \right) \right\}. \quad (10)$$

Выражения, стоящие в квадратных скобках, не интегрируются в конечном виде. Применим к ним рекуррентную формулу [7]

$$\int \frac{x^m dx}{\ln x} = \int \frac{e^{-y}}{y} dy,$$

где  $y = -(m+1) \ln x$ .

Тогда

$$\int_0^x \frac{dx}{\ln x} = \int_{-\infty}^{\ln x} \frac{e^{\ln x}}{\ln x} d(\ln x) = \overline{E}_i(\ln x),$$

$$\int_0^x \frac{x dx}{\ln x} = \int_{-\infty}^{2 \ln x} \frac{e^{2 \ln x}}{2 \ln x} d(2 \ln x) = \overline{E}_i(2 \ln x),$$

$$x = \frac{aH}{0,145 D_0} + 1. \quad (11)$$

Значения интегральных показательных функций  $E_i(x)$  могут быть найдены по таблицам [8].

Окончательно формула для расчета средней концентрации примеси на предельной дальности струи с учетом преобразований (11) примет следующий вид:

$$\overline{c} = \frac{c_0 \left\{ \frac{2}{3} a \operatorname{ctg}^2 \alpha H^3 + (2ra \operatorname{ctg} \alpha + 0,145 D_0 \operatorname{ctg}^2 \alpha) H^2 + 0,58 D_0 \operatorname{ctg} \alpha H + \right.}{\operatorname{ctg}^2 \alpha H^2 + 4r \operatorname{ctg} \alpha H + 2r^2 \ln x} \left. + 0,29 D_0 r^2 [E_i(2 \ln x) - E_i(\ln x)] \right\}}{\operatorname{ctg}^2 \alpha H^2 + 4r \operatorname{ctg} \alpha H + 2r^2 \ln x} \quad (12)$$

Полученная зависимость справедлива для условий полного штиля, часто наблюдающегося при мощных температурных инверсиях в атмосфере, т. е. для наиболее трудных условий проветривания. В этом случае облако загрязненного воздуха, выброшенное из карьера, долго не будет рассеиваться в атмосфере из-за малой величины коэффициента турбулентности обмена. Рассчитанная в качестве примера по формуле (12) средняя концентрация на предельной дальности струи вентилятора АВК-4 при  $H=100$  м,  $c_0=20$  мг/м<sup>3</sup>,  $\alpha=45^\circ$ ,  $r=100$  м составила 6,2 мг/м<sup>3</sup>, т. е. для рассмотренных условий в процессе подъема достигается более чем трехкратное разбавление вредных примесей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ецин Б. Ф. и др. Борьба с пыленностью и загазованностью в карьерах.— «Горный журнал», 1972, № 1, с. 77—79.
2. Вульфсон Н. И., Левин Л. М. Оценка возможного влияния вертикальных нагретых струй на развитие внутримассовых кучевых облаков.— Тр. ИПГ», 1970, вып. 12, с. 52—69.
3. Филатов С. С. К выбору средств и схем искусственной вентиляции карьеров.— «Горный журнал», 1970, № 6, с. 14—18.

4. Вершинин А. А. и др. Определение с помощью ЭВМ рационального по энергетическим затратам способа искусственного проветривания карьеров.— «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1970, № 1, с. 102—109.
5. Филатов С. С. и др. Установки для вентиляции карьеров вертикальными струями.— «Цветная металлургия», 1971, № 13, с. 12—14.
6. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960. 715 с.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., Физматгиз, 1965. 608 с.
8. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М., «Наука», 1968. 343 с.

## ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ

### Задачи исследований

Известно, что эффективное проветривание больших объемов обеспечивается свободными турбулентными потоками, которые при естественном проветривании представляют собой ветровые и конвективные потоки, а при искусственной вентиляции — струи, в том числе и неизотермические.

Применяя для вентиляции современных карьеров и карьеров будущего (объем 40—700 млн. м<sup>3</sup> и более) технику, создающую потоки воздуха, близкие по своему характеру и масштабам к ветровым и конвективным, можно, управляя такими потоками, эффективно проветривать любой участок или весь карьер.

Это, в частности, достигается с помощью турбореактивных авиационных двигателей, создающих свободные турбулентные неизотермические струи с начальными скоростями 500—600 м/с, расходом 400—500 м<sup>3</sup>/с и температурой 400—600°С. Эжектируя загрязненный воздух, такая струя выносит его из карьера в количестве 10—40 тыс. м<sup>3</sup>/с и более.

Поведение свободных неизотермических струй в полугограниченном пространстве (карьере) исследовано недостаточно. Не совсем ясна также картина взаимодействия искусственных и естественных потоков воздуха в карьере. Между тем работа струи реактивного двигателя в полугограниченном пространстве может вызвать или рециркуляцию, или настиление струи по почве карьера. Первое явление нежелательно, а второе улучшает вымывание вредных примесей из карьера.

Проверить наличие и действие указанных явлений в производственных условиях весьма сложно, требуются значительные материальные затраты, что относится и к разработке оптимальных схем проветривания. Все эти задачи проще решаются моделированием.

## Выбор модели

Основными вредностями в атмосфере карьеров являются токсичные и канцерогенные газы и пыль. Контролировать их в модели очень сложно.

Известно, что поля температур в турбулентных потоках аналогичны полям вещества [1]. Вследствие этого и менее сложного характера замеров температур воздуха за основу была принята тепловая модель.

Вентиляционный процесс можно рассматривать как организованное взаимодействие естественной и вынужденной конвекции. Этот процесс описывается уравнениями теплопроводности и теплообмена (на границах), а также уравнениями сплошности движения вязкой жидкости и ее состояния.

Учитывая реальные возможности моделирования процессов проветривания карьеров больших объемов в сложной метеорологической обстановке, мы исходили из следующей предпосылки.

Количественное исследование не обязательно выливается в полное строгое решение. Обычно прийти к такому решению трудно или невозможно, а подчас в этом нет необходимости. В очень многих случаях можно удовлетвориться приближенной оценкой величин, существенных для задачи. Сопоставление приближенных значений этих величин может создать основу для построения картины развития процесса, для выделения основного и исключения менее важных частных.

Согласно правилам приближенного моделирования [2, 3], для воспроизведения на модели исследуемого процесса в данном случае необходимо, помимо геометрического подобия, соблюдение подобия аэродинамических и эжекционных свойств струи реактивного двигателя, метеорологической ситуации в карьере, а также характера и степени загрязнения атмосферы карьера.

Технические условия не позволили сделать модель карьера больше, чем в масштабе 1:1000. Моделирование велось на трех моделях карьеров глубиной 90, 215, 370 м и объемом 58, 88, 241,5 млн. м<sup>3</sup>.

## Критерии подобия

Подобие неизотермической струи достигается, когда в модели струя имеет турбулентный режим движения  $Re \geq 2000$  и соблюдается инвариантность определяющего критерия Архимеда

$$A_r = \frac{gl}{U^2} \beta \Delta t, \quad (1)$$

где  $Re$  — критерий Рейнольдса;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $l$  — линейный размер, м;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения, 1/°C;  $\Delta t$  — разность температур воздуха (наружного и в струе), °C.

Исходные данные по параметрам струи в модели с учетом масштаба  $\frac{l_M}{l_n} = M = \text{const}$ , где  $m, n$  — индексы модели и натуре, и отношения  $\frac{Ar_n}{Ar_M} =$  можно получить по зависимостям для скоростей  $U_M$  м/с

$$U_{M. п} = \frac{U_{n. п}}{\left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{\frac{1}{2}} M^{-\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

где  $n, y$  — индексы притока и установившегося состояния; объемных расходов  $L_M$  м<sup>3</sup>/с.

$$L_{M. п} = \frac{L_{n. п}}{\left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{\frac{1}{2}} M^{-\frac{5}{2}}}, \quad (3)$$

коэффициента кратности обмена  $n_M, 1/\text{ч}$

$$n_{M. п} = \frac{n_{n. п}}{\left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

теплоизбытков  $Q_M$  ккал/ч

$$Q_{M. п} = \frac{Q_{n. п}}{\left(\frac{c_{pH} j_H}{c_{pM} j_M}\right)_п \left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{\frac{5}{2}} M^{\frac{5}{2}}}, \quad (5)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении, ккал/(кг·°С);  $j$  — удельный вес, кг/м<sup>3</sup>; теплонапряженность  $q_M$  ккал/(ч·м<sup>3</sup>)

$$q_M = \frac{q_n}{\left(\frac{c_{pH} j_H}{c_{pM} j_M}\right)_п \left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{\frac{3}{2}} M^{-\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Процессы естественного и искусственного проветривания могут быть неустановившимися, поэтому необходимо соблюдать инвариантность критерия гомохронности  $Ho$

$$Ho = \frac{U \tau}{l}, \quad (7)$$

где  $\tau$  — время, прошедшее с начала процесса вентиляции, с. Тогда из соотношений (2) и (7) с учетом  $l_M/l_n = M$  получим

$$\tau_M = \tau_n \left(\frac{\beta_n}{\beta_M}\right)_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_M}\right)^{-\frac{3}{2}} M^{-\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

В натуре и модели имеют место диффузионные явления. Они могут налагаться на процесс искусственного проветривания. Ка-

залось бы, без учета этих явлений нельзя получить достоверные результаты моделирования. Возникает необходимость соблюдения критериев подобия Пекле ( $Pe = \frac{ul}{D}$ ) и Фурье ( $F_0 = \frac{D\tau}{l^2}$ )

Здесь  $D$  — коэффициент молекулярной диффузии,  $m^2/c$ .

Действительно, в модели и натуре скорость диффузии газов примерно одинакова, а линейные размеры отличаются значительно. Следовательно, процессы диффузии в карьере и модели будут иметь различие во времени. Насколько оно существенно, можно судить по тому, что в натуре и модели имеет место развитый турбулентный режим, при котором отношение коэффициента турбулентной диффузии  $A$  к коэффициенту молекулярной диффузии  $D$  составляет

$$\frac{A}{D} = 10^{-3} (2 \div 4) Re.$$

Кроме того, в нашем случае диффузия тепла (вредных примесей) происходит с постоянной интенсивностью, что обуславливает установившийся термодинамический фон. Эффективность же процесса искусственного проветривания определяется количеством удаленного избыточного тепла по отношению к установившемуся начальному термодинамическому фону.

### Имитация натуральных условий в модели

Искусственное проветривание открытых горных разработок производится главным образом при инверсионном режиме атмосферы карьеров.

Создание в модели инверсионного режима путем охлаждения воздуха затруднено. Кроме того, сложно учитывать холодопроиз-

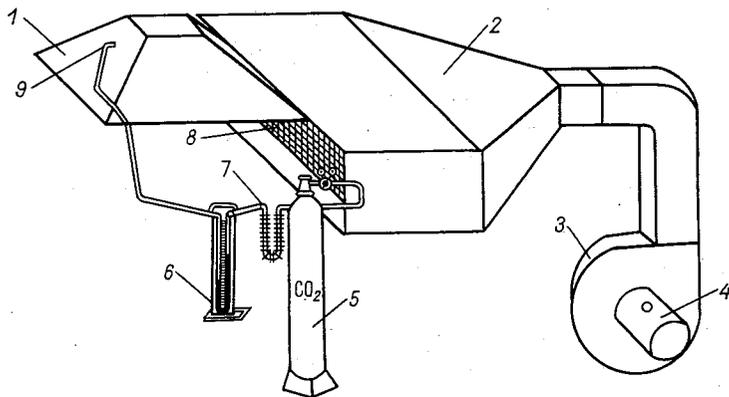


Рис. 1. Схема тепловой модели.

1 — модель карьера; 2 — труба; 3 — вентилятор; 4 — шибер; 5 — баллон с газом; 6 — реометр; 7 — теплообменник; 8 — направляющие сетки; 9 — газоподающая трубка.

водительность охладителей. Поэтому было решено нагревать модель карьера, перевернутую дном вверх (рис. 1), и моделировать неизотермическую струю более холодным, с большей плотностью, чем окружающая среда, воздухом или газом. Из этих соображений был выбран углекислый газ как наиболее доступный и безопасный.

Правомерность такой замены подтверждается тем, что количественные значения начальных импульсов обеих струй с учетом масштабов моделирования равны, и следовательно, их главное свойство — эжекция вещества из окружающей среды — остается неизменным [4, 5].

Для перенесения параметров струи реактивного двигателя на модель приняты следующие данные:

Начальные параметры струи:

скорость, м/с . . . . .	514
температура, °С . . . . .	500
расход, м <sup>3</sup> /с . . . . .	440
Диаметр насадка	$d=0,853$ м, тем-
	пература наружного воздуха $t=10^{\circ}\text{C}$ .

Расчеты показали, что модель струи в масштабе 1:1000 ( $d=0,85$  мм) не обеспечивает необходимую начальную турбулентность потока. Поэтому для увеличения  $Re$  моделировалась часть струи, удаленная за начальный участок.

Пользуясь формулами Г. Н. Абрамовича для расчета свободных осесимметричных струй [1], были получены следующие параметры струи двигателя в сечении диаметром 9,9 м:

Длина начального участка, м . . . . .	4,05
Расстояние от сопла до моделируемого сечения, м . . . . .	14,4
Осевая скорость, м/с . . . . .	115
Расход струи, м <sup>3</sup> /с . . . . .	1520
Средняя скорость струи, м/с . . . . .	19,7
Среднее приращение температуры, °С	18,8

Для струи модели критерий Архимеда выражается через плотность углекислого газа  $\rho$  и разность плотностей последнего и воздуха  $\Delta\rho$ :

$$Ar_M = \frac{g l_M \Delta \rho_M}{U_M^2 \rho_M} \quad (9)$$

Если упростить отношение  $Ar_n/Ar_m$  и выразить  $e_n/e_m$  через  $M$ , значение параметров струи в модели определится по следующим выражениям:

для скорости движения (м/с)

$$U_m = \frac{U_n \Delta \rho_m^{\frac{1}{2}}}{(\beta_n \Delta t_n \rho_m)^{\frac{1}{2}}} M^{-\frac{1}{2}} = \frac{19,3 \cdot 0,069^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{273} \cdot 18,3 \cdot 0,191\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot 1000^{-\frac{1}{2}} = 1,43 \quad (10)$$

и для расхода ( $M^3/c$ )

$$L_m = \frac{L_n \Delta \rho_m^{\frac{1}{2}}}{(\beta_n \Delta t_n \rho_m)^{\frac{1}{2}}} M^{-\frac{5}{2}} = \frac{1520 \cdot 0,069^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1}{273} \cdot 18,8 \cdot 0,191\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot 1000^{-\frac{5}{2}} = 11 \cdot 10^{-5}. \quad (11)$$

Число Рейнольдса для модели струи равно

$$Re = \frac{U d_m}{\nu} = \frac{1,43 \cdot 9,9 \cdot 10^{-3}}{7,382 \cdot 10^{-6}} = 1920, \quad (12)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость углекислого газа,  $m^2/c$ .

Для увеличения числа Рейнольдса насадок двигателя в модели снабжен турбулизирующей решеткой.

Соблюдение метеорологических условий природы в модели карьера достигалось за счет создания соответствующей температурной стратификации, обеспечивающей понижение теплового градиента от «дна» карьера к его «поверхности». Это создавало тепловой подпор в перевернутой модели, имитирующей инверсию. Соответственно тепло, выделенное в модели электронагревателем, имитировало загрязненность воздуха вредными примесями.

Нередко при инверсионном режиме атмосферы карьера в слоях воздуха, расположенных над карьером, наблюдаются ветровые потоки с небольшой скоростью (1,5—2 м/с). Такие потоки, не обеспечивая полного разрушения инверсии и эффективной вентиляции карьеров глубиной свыше 100 м, при совокупном действии с искусственной вентиляцией интенсифицируют общекарьерное проветривание.

Ветровой поток моделировался струей, создаваемой центробежным вентилятором типа Ц-9-57 № 3 и исходящей из трубы прямоугольной формы (рис. 1).

Для создания эпюры скоростей потока над моделью карьера, подобной эпюре скоростей в природе, начальный участок струи должен перекрывать модель. Исходя из этого условия было рассчитано сечение трубы.

Длина начального участка струи должна быть не менее длины модели по ее поверхности в плане, т. е.  $l'_m \geq 1,2$  м. Высота трубы  $b_m$  определяется по выражению

$$b = \frac{l'_m a}{0,515} = \frac{1,2 \cdot 0,12}{0,515} = 0,28, \quad (13)$$

где  $a$  — коэффициент структуры плоскопараллельной струи.

Практически высота выходного сечения трубы составляла 0,4 м, а ширина 2 м, с превышением ширины модели на 0,8 м.

Масштаб перевода скоростей ветра с натуры на модель принят 1:1, так как при этом сохраняется необходимая степень турбулентности и количество воздуха, поступающего в модель. Этот масштаб соответствует геометрическому масштабу по объему  $M_V = 10^9$ .

### Пересчет на натуру

Изменение температурного поля в моделях карьеров контролировалось с помощью термосопротивлений типа ММТ-1 и осциллографа Н=700. Это позволило фиксировать процесс удаления тепла (вредных примесей) в начальный период и при установившемся режиме проветривания. В опытах применялись различные схемы (варианты) установки двигателей.

Определяющими элементами схем проветривания являются: угол вертикального наклона струи двигателя к горизонту, начальные расходы струи, расстояние между двигателями и высота их установок над «дном» карьера.

Данные изменения температурного поля модели переводились в условную концентрацию вредных примесей  $c$  Дж/м<sup>3</sup>, представляющую количество избыточного тепла в 1 м<sup>3</sup> воздуха, отнесенное к секундной интенсивности тепловыделения. Расчеты велись по выражению

$$c = \frac{G_s t}{VN}, \quad (14)$$

где  $G_s$  — переводный коэффициент, Дж<sup>2</sup>/((°С·с), отражающий величину концентрации избыточного тепла (произведение веса воздуха в объеме модели на его теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·°С) при температуре 1°С на 1 Дж тепловыделения в секунду;  $V$  — объем модели, м<sup>3</sup>;  $N$  — мощность нагревателя, Дж/с;  $t$  — избыточная температура в модели, °С.

Результаты моделирования были использованы для получения на ЭВМ уравнений регрессии [6], с помощью которых были определены оптимальные схемы проветривания, т. е. оптимальные параметры работы передвижных реактивных вентиляторных установок (режим, число оборотов в минуту и угол вертикального наклона струи двигателя), а также местоположение последних

в карьере. Это в свою очередь позволило провести натурные эксперименты с наибольшей эффективностью.

В качестве определяющих критериев эффективности схем проветривания были приняты остаточное содержание вредных примесей (тепла) в воздухе карьера (модели), численное значение которого равно или ниже предельно допустимой концентрации, и коэффициент обмена воздуха в карьере. Остаточная концентрация  $c$  и коэффициент обмена  $k_{об}$  переводились на натуру.

Определение масштаба для пересчета содержания вредных примесей в модели (Дж/м<sup>3</sup>) на натуру (% по объему для конкретного газа или мг/м<sup>3</sup> для пыли) возможно по интенсивности выделения вредных примесей в карьере и модели.

Процесс выноса вредных примесей из атмосферы карьера свободной неизотермической струей в условиях, когда в карьер поступает наружный воздух, описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$Vdc = Gd\tau - kLcd\tau. \quad (15)$$

После преобразования и интегрирования уравнение (15) примет вид

$$c = \left( c_n - \frac{G}{kL} \right) e^{-\frac{kL}{V}\tau} + \frac{G}{kL}, \quad (16)$$

где  $c$  и  $c_n$  — переменная и начальная концентрация вредных примесей, мг/м<sup>3</sup>;  $G$  — интенсивность выделения вредных примесей, мг/с;  $k$  — коэффициент развития струи;  $L$  — расход струи на выходе из карьера, м<sup>3</sup>/с;  $\tau$  — время проветривания, с.

Для условий динамического равновесия, когда  $dc/d\tau = 0$ , получим

$$c = \frac{G}{kL}. \quad (17)$$

Используя выражение (17), определяем масштаб концентрации вредных примесей:

$$M_c = \frac{c_m}{c_n} = \frac{\frac{G_m}{kL_m}}{\frac{G_n}{kL_n}}. \quad (18)$$

Преобразовав выражение (18) путем замены  $L_n$  на  $L_m$  через масштаб расхода  $M_L$ , равный в нашем случае  $13,8 \cdot 10^6$ , и произведем соответствующие сокращения, получим

$$c_n = \frac{c_m G_n}{13,8 \cdot 10^6 G_m}. \quad (19)$$

По данным многолетних наблюдений, общее содержание окиси углерода и окислов азота при загрязнении атмосферы карьеров выхлопными газами близко к предельно допустимым концентрациям. Превышение ПДК характерно для акролеина, поэтому

оценка эффективности схем проветривания производилась по его содержанию.

Масштаб для пересчета коэффициента обмена модели на натуре определяется по выражению

$$\frac{k_{об. м}}{k_{об. н}} = \frac{\frac{kL_M}{V_M} \tau_M}{\frac{kL_H}{V_H} \tau_H} \quad (20)$$

Заменяя в формуле (20)  $kL$ ,  $\tau$  и  $V$  их числовыми масштабами ( $M_L = 13,8 \cdot 10^6$ ;  $M_\tau = 72$ ;  $M_V = 10^9$ ), получим

$$k_{об. н} = k_{об. м} \quad (21)$$

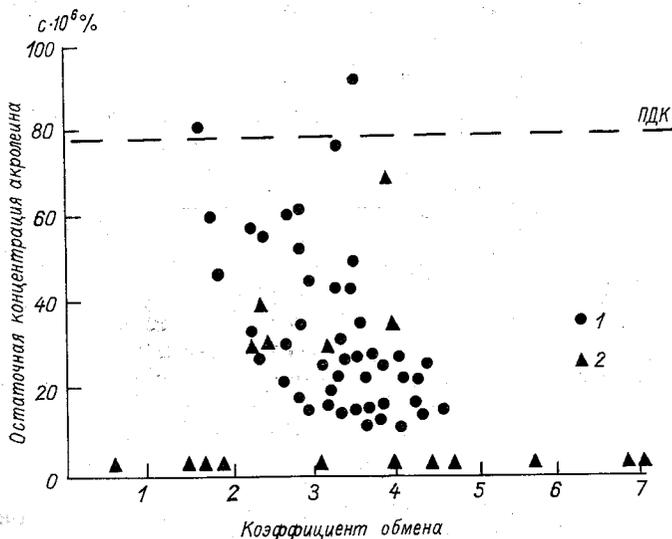


Рис. 2. Эффективность схем проветривания установкой на базе турбореактивного двигателя РД-3М.

1 — результаты моделирования, 2 — производственные испытания.

Следовательно, при моделировании соблюдено также условие подобия еще одного важного критерия.

Эффективность различных схем проветривания на модели, с учетом выражений (19) и (21), и в натуре отражена на рис. 2.

Среднее отклонение  $k_{об. н}$  от  $k_{об. м}$  находится в пределах 6%. Содержание акролеина в модели и натуре имеет в основном один порядок.

Наличие более низких концентраций акролеина в натуральных опытах по сравнению с моделью можно объяснить следующими положениями:

а) в модели приняты более жесткие условия интенсивности выделения вредных примесей (взято максимально возможное количество автосамосвалов и принята значительная изношенность их двигателей);

б) в атмосфере карьера имеют место процессы самоочищения воздуха от вредных примесей. Количественная сторона этих процессов не изучена и поэтому не учтена при моделировании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960. 715 с.
2. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. М., «Высшая школа», 1967. 303 с.
3. Кирпичев М. В. Теория подобия. М., Изд-во АН СССР, 1953. 96 с.
4. Яковлевский О. В. Гипотеза об универсальности эжекционных свойств турбулентных струй газа и ее приложения.— «Изв. АН СССР. Механика и машиностроение», 1961, № 3, с. 40—54.
5. Бугаков С. Е. Основы вентиляции горячих цехов. Свердловск, Metallургиздат, 1962. 288 с.
6. Бухман Я. З., Гинзбург Е. А. Проветривание карьеров свободными неизотермическими струями.— «Тр. Уральского науч.-исслед. и проектного ин-та медной промышленности», 1969, № 11, с. 136—141.

М. М. КОНОРЕВ, В. Н. МАКАРОВ, Г. Ф. НЕСТЕРЕНКО,  
С. С. ФИЛАТОВ

## К МЕТОДИКЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КАРЬЕРОВ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### Основные положения теории подобия

Гидродинамические и диффузионные процессы, происходящие при искусственном проветривании карьеров, весьма сложны, и теоретический расчет их без проведения предварительных экспериментальных исследований практически невозможен.

При моделировании схем искусственной вентиляции карьера необходимо соблюдать следующие условия подобия [1]:

а) геометрическое, когда выдерживается постоянное соотношение между сходственными линейными размерами, т. е.

$$\frac{L_M}{L_H} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $L_H$  — некоторый характерный линейный размер натурального карьера и вентиляторов;  $L_M$  — то же моделей карьера и имитаторов вентиляционных установок;

б) кинематическое, когда справедливо равенство

$$\left(\frac{u_1}{u_2}\right)_H = \left(\frac{u_1}{u_2}\right)_M \quad (2)$$

отношения скоростей в сходственных точках струй натуральных вентиляторов и их имитаторов, ограниченных геометрически подобными поверхностями (в нашем случае геометрически подобные поверхности карьера и его модели);

в) динамическое подобие, когда два потока (струи) ограничены геометрически подобными поверхностями и какие-либо из сил, действующих на сходственные элементы, пропорциональны в обоих потоках, т. е.

$$\left(\frac{P}{F}\right)_H = \left(\frac{P}{F}\right)_M, \quad (3)$$

иначе говоря, отношение работ этих сил должно быть одинаковым на сходственных участках траекторий струй. В конечном итоге динамическое подобие при моделировании схем искусственной вентиляции может быть сведено к равенству начальных скоростей струй натуральных вентиляторов и их имитаторов, т. е.

$$u_n = u_m. \quad (4)$$

Для соблюдения подобия процессов проветривания карьера и его модели необходимо соблюсти равенство критериев гомохронности и Рейнольдса. Критерий Рейнольдса

$$\frac{u_m L_m}{\nu_m} = \frac{u_n L_n}{\nu_n} = Re \quad (5)$$

представляет собой величину отношения сил инерции к силам внутреннего трения.

В связи с тем, что при линейном масштабе модели и природы 1/1000 осуществить равенство критериев Рейнольдса практически невозможно, при моделировании процессов проветривания карьеров достаточно соблюсти геометрическое подобие натуральных объектов и моделей, кинематического (в автомобильной области) и динамического подобия струй, создаваемых вентиляторными установками и их имитаторами. Соотношение времени проветривания карьера и его модели с известными допущениями может быть выведено из равенства коэффициентов обмена  $Qt/V$  натурального карьера и его модели. Равенство

$$\left(\frac{Qt}{V}\right)_n = \left(\frac{Qt}{V}\right)_m \quad (6)$$

можно представить в виде

$$\left(\frac{L^2 \frac{L}{t} t}{L^3}\right)_n = \left(\frac{L^2 \frac{L}{t} t}{L^3}\right)_m$$

или

$$\frac{u_n t_n}{L_n} = \frac{u_m t_m}{L_m}. \quad (7)$$

Из выражения (7) выводим выражения для определения временного масштаба

$$m_t = \frac{t_m}{t_n} = \frac{u_n L_m}{u_m L_n} = \frac{m_L}{m_u} \quad (8)$$

и времени проветривания натурального карьера

$$t_n = \frac{t_m m_u}{m_L}.$$

При значении скоростного масштаба  $m_u=1$  временной масштаб равен линейному,  $m_t = m_L$ , а время проветривания натурального карьера в этом случае определяется из выражения

$$t_n = \frac{t_m}{m_L}. \quad (9)$$

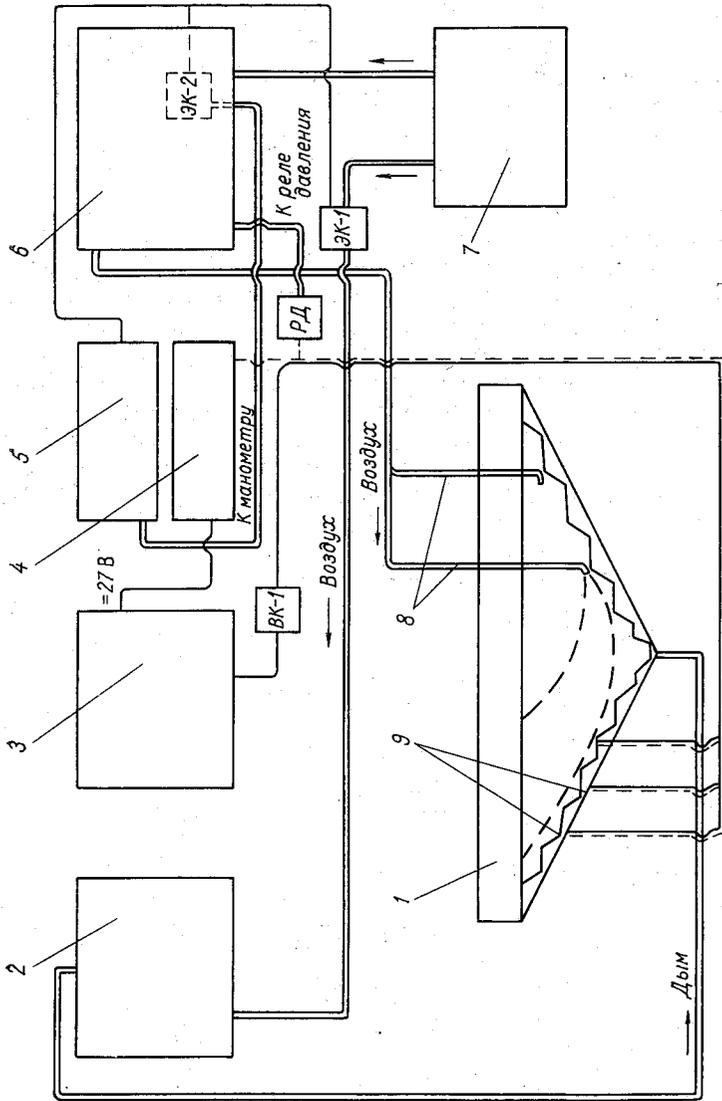


Рис. 1. Принципиальная схема стенда для моделирования искусственной вентиляции карьеров.  
 1 — модель карьера, 2 — дымовой генератор, 3 — блок выпрямителя, 4 — осциллограф НО04, 5 — контрольный щит, 6 — расходомерный блок, 7 — компрессор, 8 — ингибиторы вентиляторов, 9 — фотолачки.

## О некоторых особенностях экспериментального стенда

Для проведения исследований по выбору рациональных схем искусственной вентиляции карьеров методом физического моделирования применяется стенд, схема которого приведена на рис. 1.

Модель карьера 1 выполняется в принятом масштабе из пенопласта, пластилина или другого формуемого материала. Дымовой генератор 2 состоит из камеры смешения, двух испарителей с соплами, нагревательных элементов, регулятора напряжения, системы кранов. Производительность дымового генератора регулируется путем изменения расхода воздуха через ротаметр РС-5. Пневма-

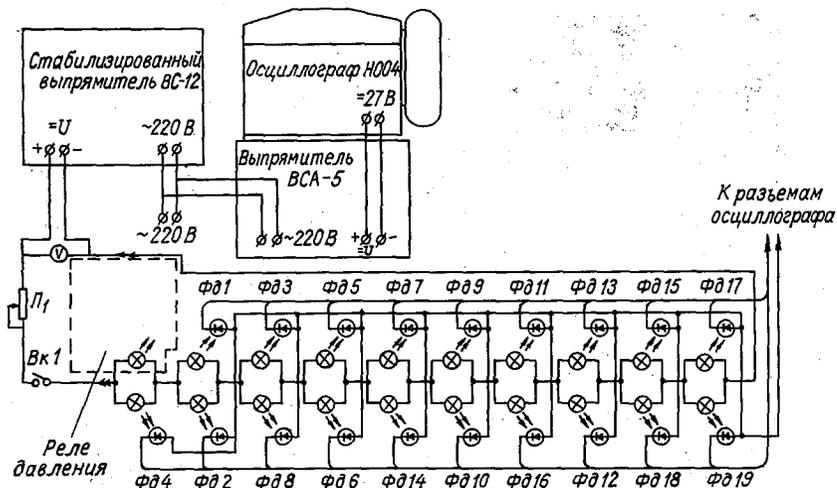


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема системы контроля концентрации дыма в модели карьера.

тическая система стенда включает имитаторы вентиляторных установок 8, компрессор 7 (высоконапорная воздуходувка, например, РГН-95), расходомерный блок 6.

Управление подачей дыма в модель карьера, воздуха в дымогенератор и имитаторы осуществляется дистанционно с помощью электромагнитных кранов.

При проветривании модели карьера воздух от компрессора поступает к ресиверу расходомерного блока, затем через редуктор и электромагнитный кран ЭК-2 идет на коллектор, к которому через ротаметры РС-5 подключены имитаторы вентиляторов. Регулирование расхода воздуха через имитаторы осуществляется игольчатыми кранами.

Введение в схему стенда расходомерного блока позволило повысить точность получаемых результатов экспериментов и производить моделирование в широком диапазоне значений начальных скоростей.

В систему регистрации концентрации дыма в модели карьера

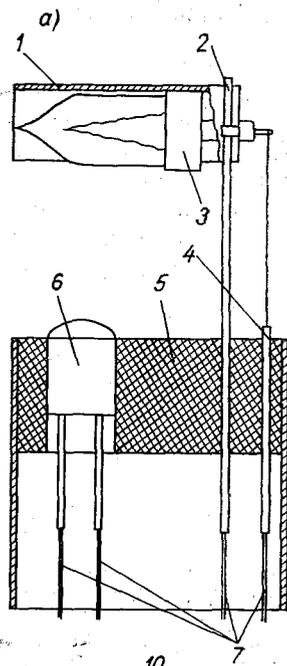
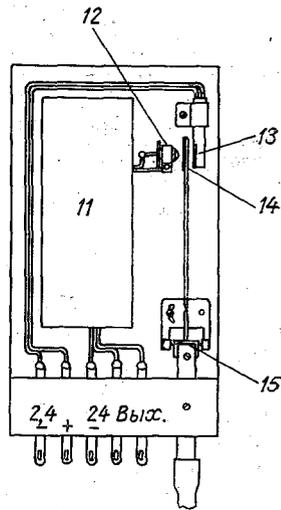
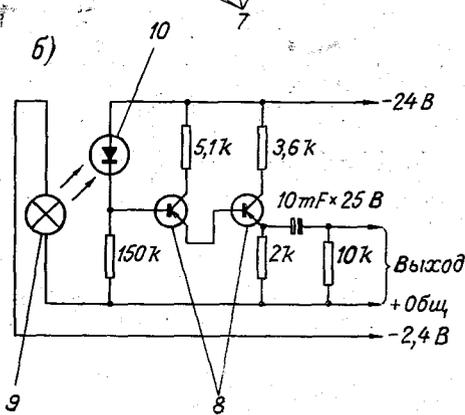


Рис. 3. Фотоэлектрический датчик контроля концентрации дыма в модели (а) и принципиальная схема датчика давления (б).

1 — отражатель, 2 — латунные стойки, 3, 9 — микроампы Э-45, 4 — обойма металлическая, 5 — плата, 6 — фотодиод ФД-3, 7 — выводы датчика, 8 — транзистор МП-40, 10, 12 — фотодиоды ФД-3, 11 — усилитель постоянного тока, 13 — арматура микроампы, 14 — светонепроницаемый экран, 15 — лепесток датчика.



(рис. 2) включены новой конструкции миниатюрный фотоэлектрический датчик (рис. 3 а) и высокочувствительный датчик давления (рис. 3 б). Датчик давления состоит из фотоэлектрической пары, усилителя постоянного тока, дифференцирующей RC цепочки и пневмомеханической системы. Он позволяет точно отметить на осциллограмме начало процесса проветривания модели карьера, что необходимо при обработке экспериментального материала.

## Оценка точности выбранного способа регистрации концентрации дыма в модели карьера

Для выбранного способа регистрации величина  $k'c$ , пропорциональная концентрации дыма в данный момент в выбранной точке карьерного пространства, может быть найдена из выражения [2, 3]

$$k'c_i = \ln \left( \frac{h_{\max}}{h} \right), \quad (10)$$

где  $h_{\max}$  — смещение светового луча на осциллограмме при концентрации дыма в модели карьера, равной нулю;  $h$  — то же самое, но в задымленной модели;  $k'$  — постоянная датчика.

По данным обработки осциллограмм по формуле (10) определяются значения  $k'c_i$  и строятся графики изменения средней безразмерной концентрации дыма в модели карьера  $\bar{c} = \frac{\Sigma c}{\Sigma c_0} = f(t)$  для выбранных схем проветривания. Анализ графиков позволяет определить наиболее эффективные схемы искусственной вентиляции.

Исходя из того, что при исследовании схем искусственной вентиляции карьеров трудно добиться постоянства концентрации дыма в модели карьера, а обработка результатов измерений весьма трудоемка, количество продувок модели должно быть минимальным, но обеспечивающим достаточную надежность измерений. Поэтому оценка метода исследований и способа обработки экспериментальных данных сводится к определению точности регистрации дыма в модели карьера при принятом ручном методе обработки осциллограмм по величине значений коэффициентов вариации  $W$  и надежности доверительного интервала  $\Delta X$ .

В связи с тем, что концентрация дыма в модели карьера измеряется косвенным путем, зависимость средней концентрации дыма в модели карьера, определяемая по средним значениям измерений всех датчиков, имеет вид

$$Y = \frac{X_1}{X_2}, \quad (11)$$

где  $X_1 = \sum_{i=1}^n \bar{k}'c_i$  — сумма средних концентраций,  $X_2 = n_1$  — число датчиков,  $Y = \bar{k}'c$  — средняя концентрация дыма в карьере.

Выражение (11) можно записать в виде

$$\bar{k}'c = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{k}'c_i}{n_1}. \quad (12)$$

В данном случае правило сложения дисперсий можно записать в виде

$$\sigma_Y^2 = \frac{\sigma_{X_1}^2}{X_2^2} + \left( \frac{X_1}{X_2^2} \right)^2 \sigma_{X_2}^2. \quad (13)$$

Принимая  $\sigma = S_n$ , уравнение (13) можно записать в виде

$$S_{nk'c}^2 = \frac{S_n \sum_{n_1}^{n_1} \overline{k'c_i}}{n_1^2} + \left( \frac{\sum_{n_1}^{n_1} \overline{k'c_i}}{n_1^2} \right)^2 S_{nn_1}^2. \quad (14)$$

Так как средняя квадратическая ошибка постоянной величины равна нулю ( $n_1 = \text{const}$ ,  $S_{nn_1} = 0$ ), то выражение принимает вид

$$S_{nk'c}^2 = \frac{S_n^2 \sum_{n_1}^{n_1} \overline{k'c_i}}{n_1^2}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) находим величину средней квадратической ошибки принятой методики измерения концентрации дыма в модели карьера

$$S_{nk'c} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{n_1}^{n_1} S_{n_1 \Sigma k'c_i}^2}. \quad (16)$$

Коэффициент вариации определяем, произведя замену  $\sigma$  на  $S_{nk'c}$  и  $\bar{X}$  на  $\overline{k'c}$ :

$$W = 100 \frac{\sigma}{\bar{X}} = 100 \frac{S_{nk'c}}{\overline{k'c}}. \quad (17)$$

Точность измерения величин амплитуд  $h_1$  (в метрах) с помощью мерительной линейки в соответствующих временных интервалах осциллограмм составляет

$$\Delta h = (\pm 0,5 \cdot 10^{-3}),$$

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 точности способа обработки экспериментальных данных находим среднюю относительную ошибку линейных измерений. Оценку производим по средним значениям  $h_{0i}$ , соответствующим нулевому интервалу, величину относительной ошибки измерений  $\delta$  определяем из выражения

$$\delta = 100 \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (18)$$

где  $\bar{h}_0$  — среднее значение величины амплитуды, соответствующей нулевому интервалу.

Принимая величину интервала  $\Delta X$  равной  $\delta/4$ , значение коэффициента Стьюдента определяем по формуле

$$t_{\alpha_n} = \frac{\delta \sqrt{n_2}}{4 S_{nk'c}}, \quad (19)$$

где  $n_2$  — общее число измерений концентрации дыма в карьере.

По полученным значениям коэффициента Стьюдента из таблицы [4] находим необходимое количество экспериментов  $n$  при заданном коэффициенте доверительной вероятности  $\alpha$ .

Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что для получения доверительной вероятности  $\alpha=0,95 \div 0,98$  достаточно каждый эксперимент (продувку каждой схемы) повторять три раза при числе датчиков 20 ( $n_2=3, n_1=20$ ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф а б р и к а н т Н. Я. Аэродинамика. М., «Наука», 1964. 814 с.
2. Т у р и ч и н А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 420 с.
3. В о л к о в В. С. Исследование воздухообмена в карьерном пространстве методом физического моделирования на примере Коркинского угольного карьера.— В кн.: Борьба с пылью и газами на карьерах. Свердловск, Среднеуральское книжное изд-во, 1970, вып. 24, с. 133—140.
4. З а й д е л ь А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., «Наука», 1968. 96 с.

## К ВОПРОСУ ИСКУССТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ ОХЛАЖДЕННЫМ ВОЗДУХОМ

С углублением карьеров для нормализации санитарно-гигиенических условий труда возникает необходимость искусственного проветривания отдельных зон рабочих участков или всего карьерного пространства в целом. В настоящее время предложено и внедряется в производство несколько таких методов искусственной аэрации. Это, в первую очередь, использование различных установок, развивающих свободные турбулентные струи, и установки с конвективным нагревом воздуха, всасывающее и нагнетательное проветривание, осуществляемое с помощью системы капитальных горных выработок или подвесных труб. Эффективность и обоснованность этих методов оценивались нами в работе [1] и в настоящей статье не рассматриваются.

Новизна проблемы определяет поиск новых возможных методов и средств искусственного проветривания для улучшения условий труда в карьерах. К числу таких работ следует отнести предлагаемый Б. В. Фаддеевым [2] метод проветривания застойных зон глубоких разрезов путем заполнения их охлажденным воздухом, а также выполненные П. И. Семенко, Г. Н. Мазановым и А. Н. Мазановым [3] исследования на модели карьера по определению оптимальных скоростей подачи охлажденного воздуха, при которых не происходит перемешивание свежего воздуха с загрязненной атмосферой.

В основу предлагаемого метода заложены диаметрально противоположные принципы общепризнанных методов искусственной аэрации карьеров и тем самым как бы открывается новая сторона исследуемого вопроса. Однако некоторые положения отмеченных выше работ представляются нам спорными и носят дискуссионный характер.

Сущность предлагаемого метода проветривания заключается в предварительном охлаждении и подаче воздуха в нижнюю рабочую зону карьера, что ведет к созданию в ней заведомо устойчивого инверсионного слоя. Предполагается, что нормализация

атмосферы в застойных зонах будет происходить путем ламинарного распространения подаваемого охлажденного свежего воздуха по дну разреза, который будет вытеснять вверх более теплый и загрязненный воздух. В этом плане данный метод следует рассматривать как некоторую модернизацию (предварительное охлаждение) нагнетательного способа проветривания, а поэтому ему присущи все достоинства и недостатки нагнетательного проветривания [4]. Несомненным достоинством нагнетательного проветривания вообще является возможность быстрого снижения концентрации вредных примесей в местах подачи воздуха, однако значительные капитальные затраты на сооружение и поддержание воздухоподающих каналов или труб, сложность их сохранения при интенсивном движении транспорта и горнодобывающих агрегатов, особенно при взрывных работах, а также потребность иметь большое количество воздухоподаточных насадок в значительной мере снижают достоинства этого метода.

Основой предлагаемого метода проветривания является замедление протекания диффузионных процессов в малоподвижных средах при искусственном снижении температуры нижнего, вытесняющего слоя воздуха, а в условиях штиля и инверсии утверждается, что застойные зоны будут надежно ограждены от загрязнения воздуха вредными примесями. Однако в подобных условиях трудно ожидать полного отсутствия турбулентной диффузии, ибо неизбежна турбулизация среды выбрасываемым из труб воздушным потоком, а наличие местных воздушных потоков даже в условиях штиля на поверхности неизбежно приведет к размытию границы загрязненного и чистого воздуха. По результатам моделирования [3] сделан вывод, что выпуск воздуха в карьер из трубопровода диаметром 1 м без перемешивания его с загрязненной атмосферой должен производиться со скоростью менее 0,1 м/с. Но такая подача воздуха ничтожно мала для проветривания карьера, так как определяет большую длительность процесса заполнения застойной зоны чистым воздухом и требует воздуховода большего диаметра. Это было бы приемлемым при отсутствии выделений примесей, но тогда зачем проветривать. Именно наличие выделений в застойную зону определяет необходимость их разбавления или удаления, при этом потребность в воздухе несоизмеримо больше, чем в рассмотренном примере.

Так как все внутренние источники загрязнения рабочей зоны в основном находятся на подошве карьера, то наибольшие уровни загрязнения при отсутствии подачи воздуха устанавливаются именно на этих участках. При этом процесс распространения и накопления примесей полностью определяется степенью устойчивости атмосферы приземного слоя воздуха. При неустойчивом состоянии ( $\gamma > 0,01^\circ\text{C}/\text{м}$ ) или при наличии ветра на поверхности карьерный воздух будет очищаться от вредных примесей поверхностными или восходящими потоками. При отрицательных градиентах, создающихся в результате охлаждения воздуха, воздухообмен затруднен, так как отсутствует перемешивание объемов воздуха

внутри карьера и в рабочей зоне. Именно такие условия вызывают наибольшую опасность с точки зрения возможных скоплений вредных примесей. При этом мощность температурной инверсии (ее глубина) и величина температурного градиента оказывают решающее влияние на местоположение зоны загрязнения и концентрацию примесей в ней, что подтверждено опытом наблюдений в производственных условиях [5].

Создание искусственного инверсионного распределения температуры в приземном слое воздуха карьера, предлагаемое Б. В. Фаддеевым, неизбежно приведет, даже при наличии вытеснения с помощью непрерывной подачи холодного воздуха, к значительным концентрациям на рабочих участках. А если учесть еще, что все вредные примеси (акролеин, окислы азота, бензиновые пары и т. п.) в 1,5—3 раза тяжелее воздуха, даже охлажденного на несколько градусов, то станет очевидным, что при таком методе из-за гравитационного осаждения неизбежно скопление вредных примесей в рабочей зоне.

В гипотетическом случае при проветривании застойной зоны объемом  $V$  м<sup>3</sup> с интенсивностью подачи охлажденного воздуха  $Q$  м<sup>3</sup>/с и при отсутствии турбулентного перемешивания на границе рабочей зоны концентрация вредных примесей поддерживается на уровне начального загрязнения ( $c_k = c_0$ ) до момента времени  $\tau'$ , определяемого временем вымывания вредных примесей из всей зоны, т. е.

$$\tau' = \frac{V}{Q}, \quad (1)$$

а затем она принимает установившееся значение, определяемое по условиям статического разбавления вредных примесей

$$c_{ст} = \frac{G}{Q} + c_b, \quad (2)$$

где  $G$  — суммарная интенсивность выделения примесей всеми источниками в рабочей зоне;  $c_b$  — концентрация примесей в подаваемом охлажденном воздухе.

В реальных условиях такая модель процесса не имеет места, поэтому необходимо учитывать как чисто механическое вытеснение, так и процесс турбулизации воздушной среды в нестационарном процессе. Поэтому схема загрязнения во всех случаях будет определяться уравнением диффузионного процесса

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{G(x, y, z, \tau)}{V} - \frac{L(x, y, z, \tau)}{V}, \quad (3)$$

где  $D_x, D_y, D_z$  — коэффициенты турбулентной диффузии соответственно в направлениях декартовых координат  $x, y, z$ ;  $G(x, y, z)$  — суммарная интенсивность выделения вредных примесей;

$L(x, y, z)$  — интенсивность выноса вредных примесей;  $V$  — объем рабочей зоны.

При известных значениях  $G(x, y, z, \tau)$  и  $L(x, y, z, \tau)$  изменение концентрации в рабочей зоне определяется величиной коэффициента турбулентной диффузии и закономерностью его изменения в данном направлении. Отсюда вытекает весьма важный вывод о влиянии коэффициента турбулентной диффузии на процессы накопления и рассеяния примесей в атмосфере карьера.

При общекарьерных инверсиях, представляющих собой наиболее трудные условия для проветривания, в карьере устанавливается практически равномерная концентрация, значение ее можно определить как среднее по объему:

$$c_k = \frac{1}{V} \int_V c_i dV, \quad (4)$$

где  $c_i$  — концентрация примеси в элементарном объеме  $dV$ .

С учетом (4) уравнение (3) можно записать в виде

$$\frac{dc_k}{d\tau} = \frac{G - L}{V}. \quad (5)$$

Раскрываем значения  $G$  и  $L$ :

$$G = g + Qc_B + Q_B c'_B, \quad (6)$$

$$L = (k_T Q + k'_T Q_B) c_k, \quad (7)$$

где  $g$  — интенсивность выделения примесей внутренними источниками в рабочей зоне;  $Q_B$  — количество поступающего в рабочую зону воздуха за счет естественного воздухообмена;  $c'_B$  — концентрация примеси в нем;  $k_T$  и  $k'_T$  — коэффициенты турбулентного перемешивания воздушных масс соответственно под влиянием вынужденной подачи и естественного воздухообмена. Физически величина  $k_T$  показывает, какая доля  $c_k$  соответствует концентрации в удаляемом воздухе.

С учетом (6) и (7) уравнение (5) можно записать в виде

$$\frac{dc_k}{d\tau} + \frac{k_T Q + k'_T Q_B}{V} c_k = \frac{g + Qc_B + Q_B c'_B}{V}. \quad (8)$$

Предполагая, что при проветривании величины  $Q$ ,  $Q_B$ ,  $g$ ,  $c_B$ ,  $c'_B$ ,  $k_T$ ,  $k'_T$  и  $V$  не меняются, получим его решение

$$c_k = \frac{g + Qc_B + Q_B c'_B}{k_T Q + k'_T Q_B} + \left[ c_0 - \frac{g + Qc_B + Q_B c'_B}{k_T Q + k'_T Q_B} \right] e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (9)$$

где  $c_0$  — начальная концентрация при  $\tau=0$ ;  $T = \frac{V}{k_T Q + k'_T Q_B}$  — постоянная времени переходного процесса.

Анализируя полученное уравнение (9), видим, что процесс изменения концентрации в рабочей зоне при подаче холодного воздуха описывается аналитически некоторым установившимся значением

$$c = \frac{g + Qc_B + Q_B c'_B}{k_T Q + k'_T Q_B} \quad (10)$$

и экспонентой с амплитудой  $c_0 - c$  и постоянной времени  $T = \frac{V}{k_T Q + k'_T Q_B}$ .

При штиле ( $Q_B = 0$ )

$$c_{ш} = \frac{1}{k_T} \left( \frac{g}{Q} + c_B \right) \quad (11)$$

$$T_{ш} = \frac{V}{k_T Q}, \quad (12)$$

т. е. установившееся значение концентрации зависит от интенсивности источников, количества подаваемого воздуха в единицу времени и коэффициента перемешивания воздушных масс. В переходном периоде интенсивность изменения концентрации прямо пропорциональна количеству подаваемого воздуха и величине коэффициента перемешивания и обратно пропорциональна величине рабочей зоны. Из сравнения выражений (2) и (11), учитывая, что  $k_T \leq 1$ , видно, что реальные значения средней концентрации в рабочей зоне всегда больше, чем получаемые, при статистическом разбавлении.

Для обеспечения санитарных норм на рабочих местах через промежуток времени  $\tau$  от начала проветривания необходимо обеспечивать интенсивность подачи свежего воздуха, определяемого из трансцендентного уравнения.

$$Q = \frac{V}{k_T \tau} \ln \frac{c_0 - \frac{c_B}{k_T} - \frac{g}{k_T Q}}{c_H - \frac{c_B}{k_T} - \frac{g}{k_T Q}} \quad (13)$$

Кстати, из уравнения (13) вытекает весьма важный вывод о том, что процесс проветривания в принципе является рациональным только в том случае, если

$$Q > \frac{g}{k_T c_H - c_B}, \quad (14)$$

т. е. подаваемый воздух для проветривания должен быть сравнительно чистым, а его концентрация

$$c_B < k_T c_H, \quad (15)$$

где  $c_H$  — предельно допустимая концентрация вредных примесей по санитарным нормам.

Среди других недостатков, присущих анализируемому методу, следует отметить трудность проветривания рабочих мест на промежуточных уступах. Современный карьер — это весьма сложный комплекс, где наряду с непосредственной добычей полезного ископаемого на дне ведутся большие горно-технические работы одновременно на промежуточных уступах и на поверхностной площадке. Непосредственное вытеснение и разбавление вредных примесей только в местах подачи охлажденного воздуха ни в коей мере не может решить проблему нормализации санитарно-гигиенических условий труда на промежуточных уступах и поверхностной площадке, а еще больше загрязняет атмосферу этих участков. Применение вентиляторов местного проветривания в данных условиях также нельзя считать целесообразным, так как это приведет только к более равномерному перемешиванию загрязненного и чистого воздуха.

Вызывает определенные сомнения также сам факт реализации равномерной раздачи воздуха в нижней зоне, сложность создания и поддержания технических сооружений, необходимость иметь несколько диффузоров, ибо требуемые расходы воздуха довольно значительны и для исключения дополнительного взметывания пыли скорость на выходе необходимо снижать до минимума.

Искусственное создание инверсионного распределения температуры при постоянном наличии конвективных перемещений воздушных масс, а также имеющей место турбулизации потоков неизбежно ведут к общему загрязнению всей чаши карьера, что является прямо противоположным основным целям искусственной вентиляции карьеров — снижению концентрации вредных примесей на рабочих местах хотя бы до санитарных норм. В теплое время года, когда потребность в искусственном проветривании может быть, например, после массовых взрывов, создание искусственных инверсий может оказаться проблематичным вообще и совершенно не реализуемым практически.

Необходимость охлаждать весьма большие объемы воздуха потребует наличия дорогостоящего и весьма энергоемкого оборудования. При этом степень охлаждения воздуха с течением времени должна возрастать, чтобы подаваемый вновь воздух был холоднее находящегося в карьере. Поэтому полные экономические затраты на реализацию этого метода будут весьма внушительными, и видимо, наиболее экономичным может оказаться один из применяемых уже на практике методов.

Таким образом, предложенный метод проветривания застойных зон глубоких карьеров путем подачи охлажденного воздуха не уменьшает опасности загрязнения как рабочих участков, так и всего карьера в целом. Зона загрязнения неизбежно будет постепенно увеличиваться и заполнять чашу карьера. Ликвидировать подобную опасность можно только увеличением турбулентности воздушной среды. Отмеченные и проанализированные недостатки предложенного метода позволяют сделать вывод о практической нецелесообразности применения его в карьерах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Иванов И. И. К вопросу о методах искусственного проветривания карьеров.— В кв.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 127—135.
2. Фаддеев Б. В. Новый метод проветривания застойных зон глубоких разрезов.— «Уголь», 1972, № 4, с. 25—28.
3. Семенко П. И., Мазанов Г. Н., Мазанов А. Н. Проветривание карьеров способом заполнения их охлажденным воздухом.— «Сб. научных трудов по санитарной технике», 1972, вып. 4, с. 23—25.
4. Битколов Н. З. Проветривание карьеров. Л., изд. ЛГИ, 1964. 138 с.
5. Лидин Г. Д. Условия, приводящие к загазованию Коркинского угольного карьера.— В кн.: Проблемы борьбы с рудничными газами и пылью. М., «Наука», 1969, с. 68—79.

## ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КАРЬЕРОВ

Известно, что проблема загрязнения атмосферы карьеров год от года приобретает все большую остроту. Причинами этого являются интенсификация и концентрация работ, прогрессирующее с глубиной снижение активности естественного воздухообмена и увеличение содержания вредных аэрозольных и газообразных примесей как на рабочих местах, так и в атмосфере карьеров в целом. Советскими и зарубежными учеными получены убедительные данные о пневмокоизоопасности некоторых профессий на открытых горных разработках.

По обобщенным данным метеорологических наблюдений, периоды неудовлетворительного естественного воздухообмена в глубоких карьерах в настоящее время составляют в среднем 10—12% рабочего времени, а простои экскаваторного парка по этой причине достигают 450—500 ч в год. Прогнозируемые цифры показывают, что возможные материальные потери только железорудных карьеров к 1985 г. вследствие вынужденных простоев могут достичь 150 млн. руб.

Таким образом, проблема оздоровления условий труда на открытых горных разработках может и должна рассматриваться не только в гигиеническом и социальном аспектах, но и экономическом.

Разработка проблемы улучшения атмосферных условий в карьерах была начата по инициативе акад. А. А. Скочинского в 50-х годах и продолжается в следующих основных направлениях:

- интенсификация естественного воздухообмена в карьерном пространстве;
- создание эффективных средств подавления пыли и газов у мест их образования;
- разработка эффективных систем кондиционирования воздуха в кабинах горных машин;

— изыскание рациональных способов и средств искусственного проветривания застойных зон и карьеров в целом.

Положительное решение проблемы оздоровления атмосферы может быть достигнуто только при комплексном использовании всех указанных мероприятий. Тем не менее с увеличением глубины особое значение приобретают вопросы искусственной вентиляции и гидрообеспыливания атмосферы карьеров.

Если воспользоваться классификацией В. А. Михайлова, разделившего карьеры по степени опасности загрязнения их атмосферы на три категории:

I — опасные (в которых возможно полное загрязнение всего карьерного пространства);

II — малоопасные (в которых возможно недопустимое загрязнение отдельных зон);

III — неопасные (в которых возможны лишь местные загрязнения в зоне работающего оборудования), то к 1985 г. до 70% железорудных карьеров перейдут в I и II категории.

В карьерах I категории, согласно принятой классификации, наряду с комплексом средств пылеподавления обязательной является общеобменная вентиляция, в карьерах II категории — местная. Для обеспечения бесперебойной работы к 1985 г. около половины карьеров Советского Союза должны иметь средства искусственной вентиляции. При этом применение средств искусственной вентиляции должно преследовать и другую не менее важную цель — защиту окружающей среды от загрязнения вредными компонентами, образующимися при ведении горных работ. Последнее обстоятельство имеет решающее значение для карьеров, расположенных в непосредственной близости или в окружении населенных пунктов.

С учетом постоянно возрастающих объемов горного производства и резкого увеличения суммарной интенсивности выделения вредных примесей необходимо в настоящее время стремиться к внедрению средств искусственной вентиляции, обеспечивающих максимальную степень подавления вредных примесей в атмосфере карьеров. В первую очередь это относится к пылегазовому облаку, образуемому при ведении взрывных работ.

В то же время гигиенические исследования показывают, что как современное, так и проектируемое горнотранспортное оборудование характеризуется весьма высокой интенсивностью выделения вредных примесей. В связи с этим потребность наиболее крупных карьеров в свежем воздухе при достигнутой эффективности средств пылегазоподавления составляет 40—50 тыс. м<sup>3</sup>/с и с годами будет возрастать.

Анализ дифференциального уравнения баланса вредных примесей с учетом фактической интенсивности выделения их в атмосферу карьеров показывает, что предельная продолжительность бесперебойной работы технологического комплекса карьеров при нарушении режима аэрации карьерного пространства не превышает в среднем 1,5—2 ч, что значительно меньше фактически на-

блюдаемой длительности штилевых периодов. Отсюда следует вывод, что средства искусственного проветривания, рассчитанные только на разжижение вредных примесей в пределах атмосферы карьеров, имеют весьма ограниченные возможности, а на глубоких карьерах наряду со средствами местного проветривания, обеспечивающими ликвидацию локальных загрязнений, необходимо иметь и более мощные вентиляторы-оросители, способные обеспечить в периоды длительных штилей подавление вредных примесей в масштабе всего карьерного пространства или вынос их с предварительным многократным разбавлением.

Выбор способа искусственного проветривания в любом случае должен производиться с учетом характера загрязнения, параметров карьера и метеорологических условий. Тем не менее предпочтение во всех случаях следует отдавать способам, предусматривающим активное подавление загрязняющих атмосферу карьера вредных примесей. Применение свободных воздушно-водяных струй не только в полной мере решает задачи местной и общеобменной вентиляции, но одновременно обеспечивает активное подавление вредных примесей в атмосфере карьеров, предотвращая загрязнение пылью и газами окружающей карьер территории.

В условиях железорудных карьеров, имеющих, как правило, значительные размеры в плане, использование изотермических вентиляционных струй является предпочтительным, так как они обладают наибольшей горизонтальной дальностью, что часто имеет решающее значение. Тем не менее, учитывая большие объемы воздухообмена в карьерах, выбор средств искусственного проветривания должен производиться с учетом энергетических затрат на его осуществление.

Анализ показал, что при любых метеорологических условиях преимущество по энергетическим затратам имеют изотермические вентиляционные струи (при равной начальной мощности источников). Экономичность струйных вентиляторов находится в прямой зависимости от диаметра ротора. Отсюда следует вывод, что задаче искусственного проветривания карьеров в наибольшей степени отвечают специальные струйные вентиляторы с максимально возможным, определяемым условиями эксплуатации диаметром ротора.

Сопоставление параметров промышленных вентиляторов и вентиляторов на базе авиационных винтов (по единым критериям сравнения) показало, что энергетические и аэродинамические характеристики струйных вентиляторов на базе авиационных винтов находятся на уровне современных низконапорных осевых вентиляторов, а вес и габариты позволяют создавать на их основе передвижные (в том числе самоходные) агрегаты, что исключается при использовании мощных промышленных вентиляторов, предназначенных исключительно для работы в стационарных условиях.

Вентиляторы на базе авиационных винтов изменяемого шага по сравнению с другими экспериментальными карьерными вентиляторами имеют существенно лучшие технико-экономические по-

казатели. Кроме того, как показали теоретические исследования Я. З. Бухмана и Л. А. Козакова [1], при различных профилях распределения концентраций вредной примеси в атмосфере карьера наибольший коэффициент эффективности обеспечивается установками на базе авиационных винтов. Например, при местном загрязнении, распространяющемся на 50 м от дна карьера глубиной 200 м, значения этого коэффициента составляют 0,27 и 0,72 соответственно для струй вентиляторов ПРВУ-РД-3м и НК-12КВ (на базе турбовинтового двигателя). При общем загрязнении атмосферы значения этого коэффициента для того же карьера соответственно составляют 0,08 и 0,22 для ПРВУ-РД-3м и НК-12КВ.

В период разрушения внутрикарьерной инверсии с высокими градиентами значения этих коэффициентов могут несколько отличаться от указанных, но продолжительность их при использовании достаточно мощной вентиляционной техники относительно невелика [2]. Оптимальным решением проблемы вентиляции глубоких карьеров является создание ряда (типажа) специализированных мобильных струйных вентиляторов-оросителей с регулируемыми в широких пределах аэродинамическими и гидравлическими параметрами. Основные задачи местного и общего проветривания карьеров могут быть решены применением вентиляторов трех типов:

а) самоходных вентиляторно-оросительных установок для местного проветривания и гидрообеспыливания с начальным расходом до  $250 \text{ м}^3/\text{с}$  и рабочей дальностью, регулируемой в пределах 50—200 м;

б) мощных вентиляторов-оросителей для создания воздушных и воздушно-водяных горизонтальных и наклонных струй с начальным расходом 1200—1500  $\text{м}^3/\text{с}$  и рабочей дальностью, изменяемой в пределах 600—1200 м;

в) вентиляторных установок, обеспечивающих создание вертикальных воздуховыдающих струй с начальным расходом 2500—3000  $\text{м}^3/\text{с}$  и рабочей дальностью 500—700 м (при инверсионном состоянии атмосферы).

На первом этапе практического решения проблемы искусственного проветривания карьеров наряду с другими средствами проветривания рекомендуются для внедрения самоходные и передвижные вентиляторы-оросители на базе авиационных винтов изменяемого шага [3].

На основании промышленных междуведомственных испытаний струйных вентиляторов-оросителей ОВ-3, АИ-20КВ, НК-12КВ и АВК-3 установлено, что применение их в карьерах целесообразно для решения следующих задач:

а) ликвидации местных и общих загрязнений атмосферы воздушными и воздушно-водяными струями;

б) ликвидации внутрикарьерных температурных инверсий методом динамического перемешивания;

в) обеспыливания и теплового кондиционирования воздуха в застойных зонах;

Таблица 1

## Основные варианты применения карьерных струйных вентиляторов

Характер загрязнения или нарушения естественного воздухообмена	Рекомендуемый способ воздействия и тип вентилятора	
	при положительных температурах	при отрицательных температурах
1. Локальное загрязнение	Подавление взвешенной пыли и газов воздушно-водяными струями. При объеме зоны загрязнения до 12 млн. м <sup>3</sup> — вентилятором ОВ-3 (УМП-1), при 12—25 млн. м <sup>3</sup> — АИ-20КВ, при объеме более 50 млн. м <sup>3</sup> — НК-12КВ	Разбавление вредных примесей свежим воздухом или вынос их в ветровой поток, УМП-1 (при V до 12 млн. м <sup>3</sup> ), установки конвективного проветривания, НК-12КВ, УВУ-1, ПВУ-6
2. Общее загрязнение	При $t > 25^{\circ}\text{C}$ периодическая обработка загрязненного объема воздушно-водяными струями. При объеме карьера до 100 млн. м <sup>3</sup> — одним вентилятором НК-12КВ, при больших объемах — группой вентиляторов	Общеобменная вентиляция системой вентиляционных струй. Вентиляторы НК-12КВ (до 60 млн. м <sup>3</sup> на один вентилятор), метеотроны (в воронкообразных карьерах)
3. Образование пылегазового облака в момент взрыва	Воздействие на облако воздушно-водяной струей. Расход воды 80—100 дм <sup>3</sup> /с на 1 т ВВ. Вентиляторы-оросители НК-12КВ, УВУ-1	Воздействие на пылегазовое облако химически активными растворами. Вентиляторы-оросители НК-12КВ, УВУ-1
4. Выделение газов из отбитой горной массы	Дегазация и обеспыливание воздушно-водяными струями. При длине развала до 120 м — ОВ-3 (УМП-1), при длине до 350 м — АИ-20КВ	Дегазация отбитой горной массы воздушными или паровоздушными струями. Вентиляторы УМП-1, АИ-20КВ
5. Сверхнормативное повышение температуры воздуха в карьере (в застойной зоне)	Искусственное дождевание атмосферы воздушно-водяными струями. При объеме зоны до 12 млн. м <sup>3</sup> — ОВ-3 (УМП-1), при объеме более 50 млн. м <sup>3</sup> — НК-12КВ	
6. Срыв пыли ветром с поверхностей, нарушенных горными работами (ветровая эрозия)	Химико-биологическое закрепление пылящих поверхностей воздушно-эмульсионными струями. Вентилятор-ороситель АИ-20КВ	Временная консервация пылящих поверхностей нанесением ледяного покрытия. Вентилятор АИ-20КВ (с подогревом)
7. Образование внутрикарьерной температурной инверсии	Ликвидация инверсии методом динамического перемешивания. Вентиляторы-оросители НК-12КВ (допустимый объем на один вентилятор 80—100 млн. м <sup>3</sup> ). Возможно применение воздушно-водяных струй	

г) дегазации и обеспыливания отбитой горной массы настилающимися воздушно-водяными струями;

д) химико-биологического закрепления воздушно-эмульсионными струями поверхностей, нарушенных при ведении горных работ открытым способом.

Условия применения рекомендованных вентиляторов-оросителей поясняются в табл. 1.

Вентиляторы, как установлено путем моделирования и натуральных экспериментов, должны оборудоваться спрямляющими аппаратами-турбулизаторами, системами изменения направления струй в вертикальной и горизонтальной плоскостях, газывыводящими устройствами и водораспыляющими соплами специальных конструкций при использовании газотурбинного привода вентиляторов.

Эффективное проветривание застойных зон и карьеров большого объема возможно лишь при одновременном использовании нескольких вентиляторов, создающих систему согласованно действующих струй. При выборе схем проветривания с использованием нескольких вентиляторов необходимо выполнять следующие условия: а) вентиляционные струи должны получать возможно полное развитие в пределах атмосферы карьеров, слияние их следует допускать лишь при недостаточной рабочей дальности одиночной струи; б) скорость потока на выходе из карьера не должна существенно превышать минимально необходимой для выноса взвешенной пыли.

Сравнительная оценка эффективности естественного и искусственного проветривания показывает, что рекомендованные средства искусственного проветривания создают вентиляционный эффект, вполне соизмеримый с действием ветрового потока. Особенной эффективностью отличаются схемы, в которых средства искусственного проветривания взаимодействуют с выносящим ветровым потоком. Средства искусственного проветривания на глубоких карьерах являются необходимым элементом комплекса мероприятий, обеспечивающего коренное улучшение условий труда на открытых горных разработках в периоды штилей. Наряду с социальным эффектом внедрение предлагаемых средств искусственного проветривания на глубоких карьерах дает, как показывают расчеты, существенный экономический эффект за счет ликвидации простоев предприятий, вероятность возникновения которых с увеличением глубины карьеров возрастает.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухман Я. З., Козаков Л. А. Сравнительная характеристика различных средств искусственной вентиляции карьеров.— В кн.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеонздат, 1974, с. 141—145.
2. Вершинин А. А., Филатов С. С. Определение энергетических затрат и времени, необходимых для ликвидации температурной инверсии при искусственной вентиляции карьеров.— «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1972, № 5, с. 84—88.
3. Филатов С. С. О средствах и режимах искусственного проветривания карьеров.— «Горный журнал», 1973, № 6, с. 22—26.

*В. В. КОНДРАТЕНКО*

## **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ЗОНЕ ФАКЕЛОВ ТЕПЛОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

Одной из важных задач тепловой вентиляции карьеров [1, 2] является задача о распространении конвективной струи в устойчивой атмосфере. Сложность ее решения состоит в том, что известными методами расчета не удастся описать однозначную связь между параметрами потока в области факелов и в конце начального участка. Это объясняется тем, что струя над тепловой установкой [1] образуется вследствие свободного взаимодействия группы открытых факелов с окружающим воздухом. В результате процессы переноса тепла и импульса, турбулентные по своей природе, ко всему прочему будут иметь и трехмерную пространственную ориентацию. Формализация такой задачи даже для стационарного режима в настоящее время представляется достаточно сложным делом.

В связи с этим в данной статье предлагается упрощенный метод расчета, основанный на ряде достаточно общих допущений, сводящихся к следующему: в зоне факелов тепловых установок [1, 2] происходит горение, отмечаются интенсивные процессы турбулентного переноса и диффузии вещества. Определяющее влияние на общую картину течения окажет перенос импульса в вертикальном направлении за счет развитой конвекции. В этом случае, если интересоваться наиболее общими функционалами движения, т. е. определять в зоне факелов средние по сечению параметры потока (энтальпию —  $h$  и скорость —  $v$ ), можно прийти к простой модели явления. Иными словами, в первом приближении можно считать, что в области факелов в вертикальном направлении движется одномерный поток цилиндрической формы. За радиус аппроксимирующего цилиндра принимается гидравлический радиус контура, очерчивающего площадь, на которой распределены тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Высота факелов ограничивает область интенсивного подвода тепла к подтекающему воздуху и может быть принята за второй характерный размер рассматриваемой системы. Из опытов на моделях выяснено, что

воздух в межфакельное пространство вовлекается непосредственно из приземного слоя и движется снизу вверх. Связано это с тем, что вертикальные линии тока соответствуют наибольшей инвариантности процессов в отдельных факелах и, следовательно, их устойчивости. Таким образом, на стационарном режиме вблизи зоны факелов устанавливается течение с максимумом скорости в приземном слое, а в межфакельном пространстве реализуется восходящее течение.

Известные в настоящее время методы расчета многофакельных систем [3, 4] для данной задачи применены быть не могут, так как значения скорости и энтальпии воздуха, поступающего в зону факелов, являются граничными условиями для случаев, описанных в [3 и 4], в нашем же подлежат определению. В связи с этим возникает необходимость применения метода расчета, базирующегося на решении задачи о переходном процессе. Для начального момента времени рассматривается физическая система, находящаяся в состоянии покоя. Затем выделившееся за счет горения тепло начнет индуцировать вертикальное движение. Результатами решения будут средние значения скорости и энтальпии потока в функции вертикальной координаты для моментов времени, соответствующих выходу системы на стационарный режим.

Формализуем рассмотренную физическую модель процесса системой уравнений, описывающих неустановившееся течение сжимаемой вязкой жидкости. При этом используем форму записи, предложенную в [5]:

уравнение неразрывности

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{4}{3}\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - (\rho - \rho_v)g, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии

$$\rho T \frac{DS}{Dt} = \frac{4}{3}\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{2q}{r_r}, \quad (3)$$

где  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $S$  — соответственно плотность, скорость, давление, температура, энтропия жидкой частицы в плоскости независимых переменных  $(t, y)$  — пространственной координаты и времени. Величины  $\rho_v$ ,  $\frac{2q}{r_r}$ ,  $r_r$  характеризуют внешние воздействия и геометрию искомой системы. В частности,  $\rho_v$  — плотность окружающей среды,  $\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{2q}{r_r}$  — интенсивность объемного тепловыделения,  $r_r$  — радиус аппроксимирующего цилиндра.

Для замыкания системы уравнений (1) — (3) добавляются функциональные уравнения состояния идеального газа и энтропии в адиабатическом процессе:

уравнение состояния

$$p = \rho RT, \quad (4)$$

уравнение энтропии

$$S = c_v \ln \frac{p}{\rho^k}. \quad (5)$$

Теплофизические характеристики  $R$ ,  $c_v$ ,  $k$  принимаются постоянными и независимыми от температуры.

В связи с тем, что интегрирование уравнений (1)—(3) проводилось численным методом, есть смысл привести запись краевых условий для конечно-разностного аналога исходной системы.

Преобразуем систему уравнений (1)—(3) к виду, удобному для численного интегрирования. С этой целью объем аппроксимирующего цилиндра разобьем на ряд частиц (рис. 1), которые будут

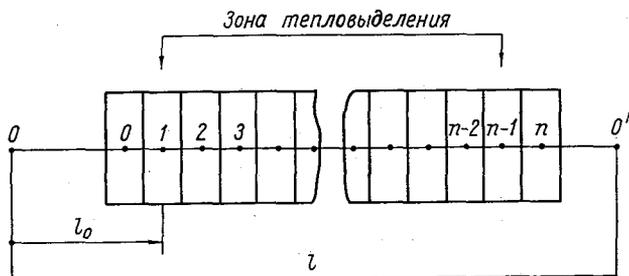


Рис. 1. Схема разностной аппроксимации зоны факелов.

перемещаться по фиксированным прямым и масса которых равна  $m = \rho \Delta y$ . Каждая частица подвержена воздействию со стороны соседних, которое представляется силами вязкости, архимедовыми и давления. Таким образом, если обозначить  $y_n$  координату  $n$  частицы, то вязкое взаимодействие между  $n$  и  $n+1$  частицами выразится

$$\sigma_{n+1/2} = \frac{4}{3} \mu \frac{\dot{y}_{n+1} - \dot{y}_n}{y_{n+1} - y_n}. \quad (6)$$

Тогда уравнение импульса можно переписать в виде

$$m \ddot{y}_n = - (p_{n+1/2} - p_{n-1/2}) + (\sigma_{n+1/2} - \sigma_{n-1/2}) - (\rho - \rho_b)(y_{n+1} - y_n)g. \quad (7)$$

Уравнение энергии с учетом (4) и (5) можно записать следующим образом:

$$\frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial y} \left[ (k-1) \frac{4}{3} \mu \frac{\partial v}{\partial y} - kp \right] + (k-1) \frac{2q}{r_r}. \quad (8)$$

В форме записи, аналогичной уравнению (7), уравнение энергии (8) будет иметь вид

$$\dot{P}_{n+1/2} = \frac{\dot{y}_{n+1} - \dot{y}_n}{y_{n+1} - y_n} [(k-1)\sigma_{n+1/2} - k\rho_{n+1/2}] + (k-1)\frac{2q}{r_r}. \quad (9)$$

Уравнение неразрывности удовлетворяется в силу аппроксимации частицами отдельных объемов системы.

Уравнения (1)–(3) могут быть приведены к безразмерному виду подстановками

$$p = p_b P = \frac{1}{k} \rho_b a_b^2 P, \quad (10)$$

$$y = l Y, \quad (11)$$

$$t = \frac{1}{a_b} \left( \frac{kml}{\rho_b} \right)^{1/2} \bar{t}. \quad (12)$$

Величины с индексом «в» (местная скорость звука  $a_b$ , плотность  $\rho_b$ ) отражают состояние системы в начальный момент времени.

Следует отметить, что влияние вязких взаимодействий на перенос тепла, массы и импульса сказывается незначительно по сравнению с конвективным. Данный вывод был получен из анализа пробных решений, которые проводились при ламинарных и соответствующих турбулентному режиму значениях динамической вязкости. С физической точки зрения малость влияния вязких членов легко объясняется небольшими градиентами зависимых переменных в рассматриваемой области ( $\bar{t}$ ,  $\bar{y}$ ).

Разностная аппроксимация по времени системы уравнений (6), (7) и (9) в пренебрежении вязкими взаимодействиями, с учетом (10)–(12), дает окончательный алгоритм численного метода расчета для  $n_0$  (1, ...,  $n-1$ ):

$$Y_n^{m+1} - 2Y_n^m + Y_n^{m-1} = \Delta \bar{t}^2 \left\{ -(P_{n+1/2}^m - P_{n-1/2}^m) - A_1 \left[ \frac{m}{\rho_b l} - (Y_n^m - Y_{n-1}^m) \right] \right\}, \quad (13)$$

$$\sum_{n+1/2}^{m+1/2} = \frac{2}{\Delta \bar{t}} \left[ \frac{Y_{n+1}^{m+1} - Y_{n+1}^m - Y_n^{m+1} + Y_n^m}{Y_{n+1}^{m+1} + Y_{n+1}^m - Y_n^{m+1} - Y_n^m} \right], \quad (14)$$

$$P_{n+1/2}^{m+1} - P_{n+1/2}^m = -\Delta \bar{t} \left( k \sum_{n+1/2}^{m+1/2} P_{n+1/2}^m + A_2 \frac{2q}{r_r} \right), \quad (15)$$

где

$$A_1 = \frac{kgl}{a_b^2}, \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{k(k-1)}{\rho_B a_B^3} \left( \frac{kml}{\rho_B} \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Для каждого временного слоя вычислительная процедура определения величин  $Y_n^{m+1}$ ,  $P_{n+1/2}^{m+1}$  проводится в последовательности, в которой расположены выражения (13)—(15).

Рассмотрим формулировку краевой задачи для случая аппроксимации системы  $n+1$  частицей (рис. 1). Для начального момента времени система находится в состоянии покоя, т. е. при  $\bar{t}=0$  и  $\dot{Y}_n=0$

$$P_{n+1/2} = 1, \quad n_0(1, \dots, n-1); \quad (18)$$

при  $\bar{t} > 0$  имеем следующее:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= \dot{Y}_1, \quad \dot{Y}_n = \dot{Y}_{n-1}, \\ P_{0+1/2} &= 1, \quad P_{n-1/2} = 1. \end{aligned} \quad (19)$$

Условия (19) отражают процессы непрерывного втекания и вытекания граничных частиц (0 и  $n$ ) в область постоянно действующего тепловыделения [6]. Поступление новых частиц фиксируется по нижней границе, т. е. как только координата нулевой частицы становится равной  $l_0$  (рис. 1), прекращается счет в старой системе и формируется новая.

Принцип построения новой системы заключается в отбрасывании  $n$  частицы и в прибавлении слева к вошедшей такой же частицы. Одновременно происходит и переформирование всех необходимых массивов:  $Y_n^{m-1}$ ,  $Y_n^m$ ,  $P_{n+1/2}^m$ .

Начиная с этого момента времени вошедшая частица считается внутренней и оказывается в поле действия разностных операторов (13)—(15). Вычислительный процесс заканчивался, когда устанавливалось равновесие между поглощением тепла и его выносом за пределы системы.

Устойчивость вычислений гарантировалась выполнением для произвольного момента времени неравенства

$$\Delta \bar{t} \leq [(Y_n - Y_{n-1})/kP]^{1/2}. \quad (20)$$

Отладка рассмотренной методики расчета проводилась на примере анализа работы тепловой установки СредазНИИпроцветмет [2]. Принцип действия ее состоит в том, что горение дизельного топлива происходит в зоне, ограниченной формирователем потока, имеющего диаметр 10 м и высоту 5 м. Сжигание топлива осуществляется в плоскости основания формирователя с помощью равномерно распределенных тепловыделителей. По данным авторов, тепловая мощность установки составляет примерно 20 000 кВт, а высота факелов равна 1,5 м. На основе этой информации по рассмотренной методике был проведен расчет параметров потока в

зоне формирователя. Результаты расчета приводятся на рис. 2. Кривая 1 описывает зависимость скорости от времени в верхнем сечении формирователя, а кривая 2 — в нижнем. Из рисунка видно, что на стационарном режиме скорость на выходе равна 10,5 м/с. Время переходного процесса составляет 7 с. По данным авторов [2], средняя скорость на выходе из формирователя равна 12—13 м/с. Следует заметить, что величина гидравлического радиуса аппроксимирующего цилиндра с учетом толщины пограничного слоя на внутренней поверхности формирователя равна примерно 4 м.

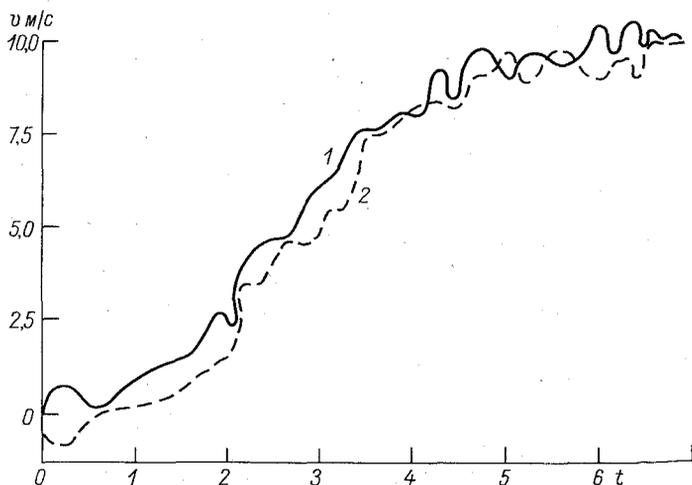


Рис. 2. Динамика процесса в тепловой установке с формирователем потока.

1 — средняя скорость на выходе из формирователя, 2 — средняя скорость на входе в формирователь.

Как видно, результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями средней скорости.

Кривые 1 и 2 (рис. 2) имеют ярко выраженные нерегулярности во времени, вызванные пульсациями зоны подвода тепла. Указанный недостаток может быть в значительной степени устранен, если увеличить число аппроксимирующих частиц. В рассматриваемом примере их количество равнялось 16, а в дальнейшем применялась разностная схема на основе 40 частиц.

Расчет процессов в неизолированной системе факелов, имеющих место при работе тепловой установки типа УТ-ЛФИ-2 [1], проводился аналогичным образом. Для этой цели при различных значениях плотности объемного тепловыделения (рис. 3) были определены скорости истечения и относительные перегревы потока в аппроксимирующих цилиндрах высотой 6 м. Так как исходная

система уравнений предварительно была преобразована к безразмерному виду, то результаты расчетов можно использовать для определения параметров потока в зоне факелов для широкого диапазона мощностей тепловых установок типа УТ-ЛФИ-2.

По данным рис. 3 можно определить, что при  $r_T = 2 \div 10$  м из приземного слоя выбрасывается  $80-200$  м<sup>3</sup>/с воздуха, обладающего существенным перегревом:

$$a = \frac{\Delta T_B}{T_B} = \frac{T - T_B}{T_B}, \quad (21)$$

где  $T$  — температура воздуха на выходе из зоны факелов.

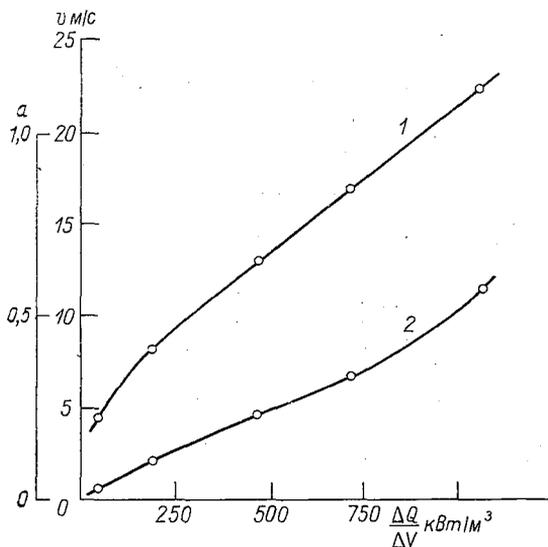


Рис. 3. Параметры потока на уровне факелов в функции объемного тепловыделения ( $T_B = 291$  К).

1 — относительный перегрев, 2 — средняя скорость.

В свою очередь это обеспечит устойчивое развитие струи в карьерном пространстве при глубоких инверсиях температуры. Для одной установки УТ-ЛФИ-2 величина гидравлического радиуса площади, на которой размещены тепловыделяющие элементы (ТВЭЛЫ), будет равна 3 м и расход воздуха на уровне факелов составляет примерно  $100-120$  кг/с.

Основная идея теплового способа [1], состоящая в глубоком регулировании начального расхода воздуха на уровне факелов с помощью изменения площади, на которой размещены установки, ввиду малых  $r_T$  оказалась неполностью реализованной. Связано это с тем, что установки УТ-ЛФИ-2, работающие параллельно и способные во время работы менять свое положение в плоско-

сти, имеют две группы жестко зафиксированных (по 17 на каждой) ТВЭЛов. В итоге задача создания струи с начальным  $r_T$  (примерно 30—35 м) оказывается нереальной. Можно лишь говорить о трех независимых потоках, которые на некоторой высоте способны организовать общую струю. Однако в этой связи появляется возможность более глубокого регулирования ее дальности, чем в случае равномерного тепловыделения.

Рассмотренный метод расчета в первом приближении позволяет найти начальные параметры конвективной струи. Наиболее качественные результаты могут быть получены для случаев, когда равномерное в объеме тепловыделение имеет место в действительности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К у н и н В. Н. и др. Вентиляция глубоких разрезов тепловым способом. М., изд. ЦНИИЭИуголь, 1972. 22 с.
2. Е ц и н Б. Ф. и др. Борьба с запыленностью и загазованностью в карьерах.— «Горный журнал», 1972, № 1, с. 77—79.
3. Г о н ц о в Н. С. Тепло- и массообмен в системе турбулентных струй при диффузионном горении.— «Тр. ЛПИ», 1970, № 313, с. 82—89.
4. А л и е в Ф. К. Тепло- и массообмен в системе плоских турбулентных струй при диффузионном горении. М., «Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа», 1968, № 2, с. 56—63.
5. Л ю д в о р д Д. ж., П о л я ч е к Г. и З е г е р Р. О неустановившемся течении сжимаемой вязкой жидкости.— В кн.: Механика, № 1 (23). М., Изд-во иностр. лит., 1954, с. 70—80.
6. Х а р л о у Ф. Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М., «Мир», 1967, с. 316—342.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Проблема проветривания современных открытых горных выработок, особенно глубоких и сильно загазованных карьеров, в настоящее время является актуальной и сложной, но требующей скорейшего решения.

Сложность процессов воздухообмена в карьерах, затруднения теоретического его познания и большие трудности выполнения исследований в натуральных условиях по качественной и количественной оценке различных способов естественного, искусственного и комбинированного проветривания требуют широкого применения для этих целей методов физического моделирования в лабораторных условиях. Известны различные методы лабораторно-экспериментальных исследований динамики воздушного потока.

В выполняемых нами исследованиях используется оптически активная жидкость и аппаратура, с помощью которой обычно проводятся эксперименты по методу фотоупругости [1, 2].

На рис. 1 приведена схема поляризационно-оптической установки.

Подобно исследованиям в методе фотоупругости при движении оптически активной жидкости в поле поляризованного света на экране оптической установки наблюдаются цветные и черные области.

Цветные области или полосы (интерференционный эффект) в потоке образуются в результате ориентации игольчатых частиц аэрозоля (например, пятиоксида ванадия) и возникновения напряжений вдоль линий скольжения. Применительно к аэро- или гидродинамике Максвеллом установлено соотношение между градиентом скорости или скоростью сдвига и двойным лучепреломлением (интерференционным эффектом):

$$n_2 - n_1 = M \mu \frac{dv}{ds} t, \quad (1)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  — главные показатели преломления,  $M$  — константа.

пропорциональности (постоянная Максвелла),  $\mu$  — вязкость жидкости,  $\frac{dv}{ds}$  — градиент скорости,  $t$  — толщина слоя потока.

Интерференционный эффект в любой точке модели может быть оценен величиной полосы

$$\tau = \frac{t}{n} \frac{dv}{ds}, \quad (2)$$

где  $n$  — порядок полосы.

Цена полосы для каждой оптически активной жидкости является постоянной величиной и зависит от длины волны применяемого источника света. Принимая во внимание, что напряжение сдвига в оптически активной жидкости зависит от вязкости градиента скорости, применяют «удельную цену полосы», равную первоначальной цене полосы, умноженной на абсолютную вязкость.

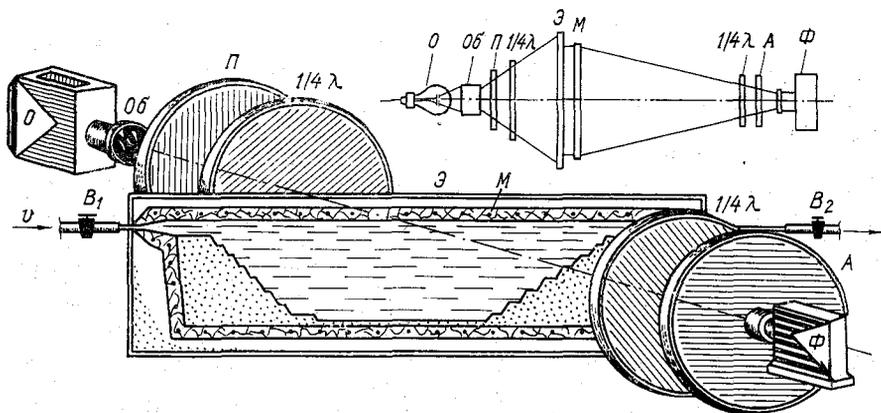


Рис. 1. Схема поляризационно-оптической установки с моделью.

$O$  — источник света,  $Ob$  — объектив для образования рассеянного света,  $П$  — поляризатор,  $1/4\lambda$  — пластина в четверть длины волны света,  $Э$  — матированный экран,  $М$  — модель,  $А$  — анализатор,  $Ф$  — фотокамера или киносъемочный аппарат,  $B_1$  и  $B_2$  — вентили.

Таким образом, можно записать, что градиент скорости

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\tau n}{t}. \quad (3)$$

В свою очередь, градиент скорости может быть выражен через разность хода лучей  $\Gamma$  [3], которая определяется обычно компенсатором в любой заданной точке модели или по кривой зависимости  $\Gamma$  от  $n$ :

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\Gamma}{Ct}, \quad (4)$$

где  $C$  — оптическая постоянная применяемой оптически активной жидкости.

Приведенные формулы (3) и (4) устанавливают возможность получения качественных и количественных решений различных задач динамики потока.

Черные области наблюдаются в случаях плоского полярископа и представляют собой геометрические места точек, в которых частицы ориентированы параллельно плоскости поляризации анализатора  $A$  или поляризатора  $P$ .

Причем, каждому углу поворота плоскости поляризации соответствует определенное положение и распространение черной области. Эти области фотографируют или вычерчивают через каждые  $10^\circ$  поворота плоскости поляризации и в заключение строят суммарную картину затемнений, которая является основанием для построения траекторий линий скольжений или направлений сдвигающих напряжений.

Кроме того, иногда в сложном потоке возникают темные области, которые не меняют своего положения при вращении плоскости поляризации. В этих областях частицы аэрозоля не имеют определенного ориентированного положения.

Таким образом, при изучении цветных и темных областей в движущемся потоке оптически активной жидкости без особых сложностей определяют в любой области модели градиенты скоростей и направления потока, тем самым получая все необходимые данные для анализа динамики движения, выбора оптимальных режимов и начальных параметров потока.

Изучение процессов движения воздуха на моделях базируется на известной теории подобия [4], которая на основании общих физических соотношений показывает, что качественные и количественные закономерности, описывающие изучаемый процесс, могут быть выражены определенной зависимостью между определяющими критериями подобия.

Аэродинамическая картина в карьерном пространстве определяется прежде всего критерием Рейнольдса — безразмерной характеристикой течения среды:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}, \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $v$  — характерная скорость,  $l$  — характерный размер,  $\mu$  — коэффициент вязкости.

Для динамического подобия двух потоков с геометрически подобными границами необходимо, чтобы определенным образом подобранные  $Re$  были равны:

$$Re_1 = \frac{v_1 l_1}{\nu_1} = \frac{v_2 l_2}{\nu_2} = Re_2, \quad (6)$$

где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (7)$$

Из равенства (6) следует, что в модели с уменьшенными размерами ( $l_2 < l_1$ ) при одинаковых коэффициентах вязкости в модели и натуре ( $\nu_2 = \nu_1$ ) скорость течения потока в модели должна быть больше:  $v_2 > v_1$ .

Для того чтобы потоки были подобны, необходимо либо приближать размеры моделей к размерам природы, либо в моделях подбирать жидкости с другими значениями кинематического коэффициента вязкости [5]. Согласно кинематической теории газов, коэффициент вязкости представляется в виде произведения плотности, длины свободного пробега молекул ( $\lambda$ ) и средней скорости теплового движения молекул ( $v_{cp}$ ):

$$\mu = \rho v_{cp} \lambda. \quad (8)$$

Тогда  $Re$  для газов выражается произведением отношений скоростей и линейных величин:

$$Re = \frac{v}{v_{cp}} \frac{l}{\lambda}. \quad (9)$$

При больших числах  $Re$  силы внутреннего трения весьма малы. Тогда безразмерные поля скоростей в сечениях карьера (или его модели) считаются постоянными при изменении критерия  $Re$ , что значительно упрощает моделирование, позволяя производить эксперименты при числах Рейнольдса в модели, значительно меньших, чем в натуре.

Кроме того, при моделировании должно учитываться так называемое диффузионное подобие, которое характеризует сходственные моменты времени при нестационарном процессе и позволяет определить масштаб времени между скоростями протекания диффузионного процесса в натуре и модели. Тогда масштаб времени ( $\alpha_t$ ) связан с линейным масштабом ( $\alpha_l$ ) и масштабом скоростей ( $\alpha_v$ ) соотношением

$$\alpha_t = \frac{t_M}{t_N} = \frac{\alpha_l}{\alpha_v}. \quad (10)$$

Модель представляет собой вертикальный плоскопараллельный лоток, боковые стенки которого выполнены из оптически неактивного прозрачного материала. Внутри этого лотка из пластилина или желатиновой смеси выкладывается заданный профиль карьера. Через вентиль  $B1$  подается с определенной скоростью поток жидкости, который вытекает по оттоку через вентиль  $B2$ . После стабилизации движения жидкости в модели фотографируют или зарисовывают полученную цветную картину и положение черных областей.

Обработка результатов исследований производится известным в методе фотоупругости способом, т. е. на основании данных тарирования лоткового потока определяются константы оптически активной жидкости во взаимосвязи с градиентами скоростей, а построение суммарной картины черных областей позволяет графиче-

ским способом построить картину траекторий потока при заданных параметрах и граничных условиях.

Таким образом, используемый метод исследований позволяет на основании изучения изменений градиентов скоростей и направлений потока выбрать наилучшие схемы проветривания с учетом конфигурации и размеров горных выработок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков И. Р., Морозов В. Д. Метод моделирования аэродинамических эффектов при проветривании горных выработок.— В кн.: Борьба с запыленностью и загазованностью при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в районах сухого и жаркого климата. Ташкент, изд. Средазниипроцветмет, 1972, с. 37—39.
2. Поляков И. Р., Морозов В. Д. Методика экспериментальных исследований качества проветривания горных выработок с использованием оптически активных жидкостей.— В кн.: Борьба с запыленностью и загазованностью при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в районах сухого и жаркого климата. Ташкент, изд. Средазниипроцветмет, 1972, с. 39—41.
3. Вятских Н. М. Оптический метод исследования жидких потоков.— «Изв. научно-исслед. ин-та по гидротехнике», 1937, т. 20, с. 257—261.
4. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., «Наука», 1967. 428 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 676 с.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ВСАСЫВАНИЯ ВИНТА КАРЬЕРНОГО ВЕНТИЛЯТОРА, СОЗДАЮЩЕГО ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТРУЮ<sup>1</sup>

При вращении винта карьерного вентилятора, создающего вертикальную струю (типа АВК), воздух подсасывается винтом снизу и сбоку и отбрасывается вверх, т. е. устанавливается воздушный поток через площадь, ометаемую винтом. Параметры этого потока характеризуются скоростью подсасывания (скоростью потока в плоскости вращения винта) и скоростью отбрасывания (скоростью потока на некотором удалении от плоскости вращения несущего винта) [1, 2].

Турбулентная струя, создаваемая отбрасываемым воздухом, непрерывно увеличивается по сечению и, следовательно, эжектирует воздух из окружающего пространства, в котором создается непрерывное поле течения, направленного к струе и винту вентилятора. Несмотря на то, что скорость этих течений невелика, знание их закономерностей необходимо для правильного расчета конструктивных параметров вентиляторных установок, определения их количества в карьере и оптимального расположения.

Рассмотрим процесс подсасывания воздуха винтом вентиляторной установки АВК-4, пренебрегая в первом приближении эжектирующим действием самой струи. Поскольку скорость подсасывания невелика, влиянием вязкости можно пренебречь и вести расчет поля течения к краевой задаче теории потенциала. Поле течения к винту вентилятора обладает симметрией относительно вертикальной оси. Исследование осесимметричных полей производится в цилиндрических координатах  $(r, z)$ . Потенциал поля  $\varphi$  в рассматриваемом случае удовлетворяет уравнению Лапласа [3]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Работа выполнена под научным руководством канд. техн. наук С. С. Филатова.



описанным в работе [5]. Модель разбивается на прямоугольные линии, параллельными осям координат. Для уменьшения проводимости бумаги вдоль оси  $r$  в середине каждого прямоугольника делается разрез, перпендикулярный этой оси. Проводимость каждого прямоугольника уменьшается пропорционально длине разреза. Описанным приемом можно получить бумагу с любой функциональной проводимостью.

Для вырезания модели задачи из электропроводной бумаги необходимо ограничить область течения, иначе вору, выбрать граничные условия.

Подтекание воздуха к винту происходит из бесконечности, которая реализуется на модели граничным условием  $\phi = \text{const}$ . Необходимо, однако, определить форму граничной эквипотенциальной. На достаточном расстоянии от винта его всасывающее действие на окружающий ствол не оказывающее действие можно уподобить действию точечного стока, расположенного на

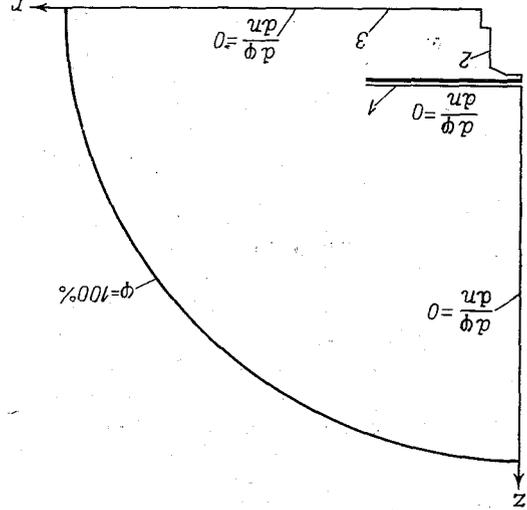


Рис. 1. Граничные условия на электрической модели при решении прямой задачи. 1 — винт вентилятора, 2 — контур двигателя, 3 — земля.

с точечным стоком на расстоянии трех радиусов винта вентилятора. По аналогии с током эквипотенциалы формулы получаются. Ввиду осевой симметрии задачи ограничиваемся исследованием течения в правом полупространстве. Вырезаем из электропроводной бумаги модель задачи в масштабе  $1/1000$  (рис. 1) и задаем значения  $\phi = 100\%$  на полукруглости, имитирующей бесконечность, и  $\phi = 0$  на нижней кромке винта при помощи шин из фольги, прикрепленных к электропроводным клею. Вдоль грани модели, оставшихся свободными, реализуется граничное условие  $d\phi/dn = 0$ . Подавая напряжение на шину, строим сетку эквипотенциалей.

Для получения линий тока строим обратную модель задачи на основе ковенной электро-гидродинамической аналогии [6]. По ковенной аналогии потенциал электрического поля служит аналогом функции тока в жидкости и наоборот. Для обративания задачи необходимо обратить граничные условия, заменив  $\phi = \text{const}$  и  $d\phi/dn = 0$  в прямой задаче на  $d\phi/dn = 0$  и  $\phi = \text{const}$  на тех же участках границы в обратной задаче. Иначе говоря, там, где в прямой задаче устанавливается шина и подавался потенциал,

бумага обрезается, а на прежних границах наклеивается шина и подается потенциал  $\varphi = \text{const}$ .

Построив эквипотенциальные линии на обращенной модели, соответствующие линиям тока  $\varphi = \text{const}$  в потоке воздуха, мы получили полную гидродинамическую сетку течения (рис. 2), которая дает наглядное представление о характере подтекания воздуха

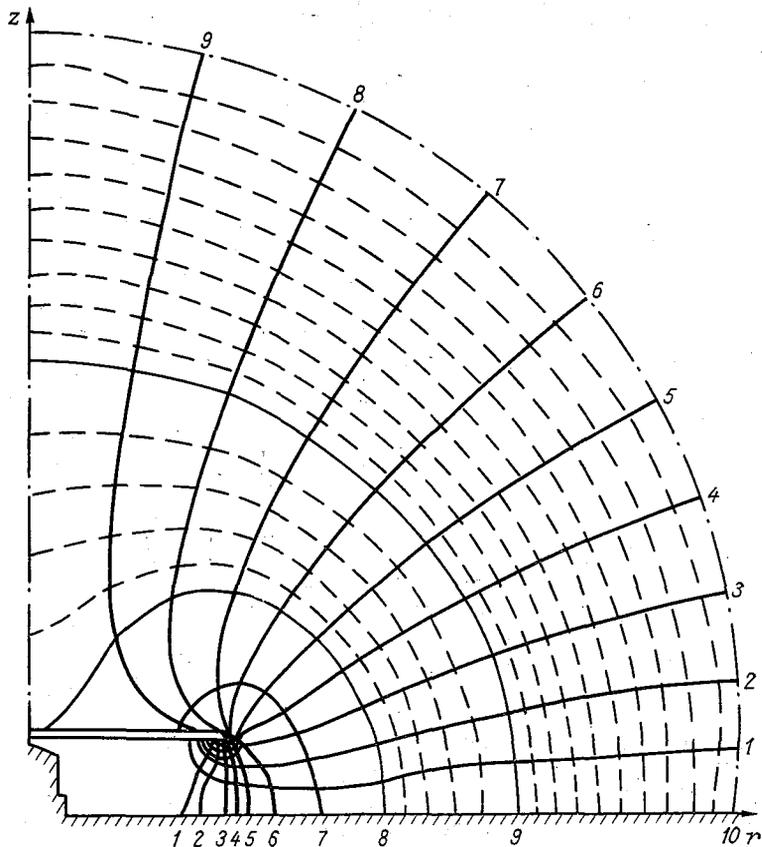


Рис. 2. Гидродинамическая сетка поля подтекания воздуха к венту вентилятора. (Спектр всасывания вента.)

к венту и позволяет определить скорость в любой точке потока. При этом линии тока будут соответствовать траекториям частиц воздуха, а эквипотенциали — изолиниям равных скоростей. Таким образом, полученная сетка изолиний является спектром всасывания вента вентилятора.

Линии тока, построенные через одинаковый шаг  $\Delta\varphi = 10\%$ , начинаются в бесконечности и заканчиваются на нижней кромке вента. Поскольку расстояние между ними при удалении от поверхности земли растет, скорость подтекания пропорционально умень-

шается. Большая густота линий тока у конца винта свидетельствует о том, что сюда подтекает 90% воздуха, а на остальную часть винта приходится 10% расхода. Такое распределение расхода свидетельствует о неблагоприятном влиянии близости земли на работу винта и о целесообразности увеличения высоты его подвески. Необходимо, однако, учесть, что для моделирования принят идеальный винт с равномерным по радиусу профилем скорости, для реального же винта распределение расхода будет более благоприятным.

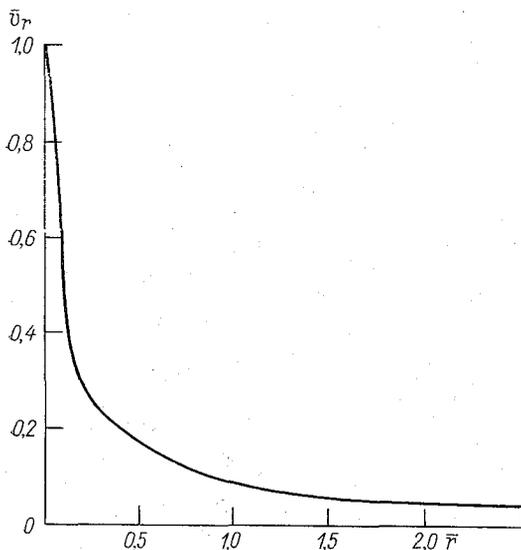


Рис. 3. Изменение безразмерной скорости воздуха вдоль поверхности земли.

Эквипотенциали  $\Delta\varphi = \text{const}$ , проведенные сплошными линиями, также построены через 10%. Увеличение расстояния между ними с удалением от винта свидетельствует о быстром падении скорости. На рис. 3 приведена зависимость безразмерной скорости  $\bar{v}_r$  от безразмерного радиуса винта  $r$  на уровне поверхности земли. График строился по формуле (2), представленной в конечно-разностной форме:

$$\bar{v}_r \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}.$$

Вначале, в интервале  $0 \leq r \leq 0,3$  скорость падает очень быстро, уменьшаясь в 5 раз, затем темп падения снижается, а скорость асимптотически стремится к нулю.

Рассмотренный пример не исчерпывает возможности применения метода ЭГДА к исследованию вопросов вентиляции карьеров, многие из которых могут быть представлены в виде краевой задачи теории поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов С. С. и др. Установки для вентиляции карьеров вертикальными струями.— «Цветная металлургия», 1971, № 13, с. 12—13.
2. Базов Д. И. Аэродинамика вертолетов. М., «Транспорт», 1969. 195 с.
3. Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. М., «Наука», 1964. 814 с.
4. Фильчаков П. Ф., Панчишин В. И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. Киев, Изд-во АН УССР, 1961. 171 с.
5. Иодко Э. А., Шкляр В. С. Моделирование тепловых процессов в металлургии. М., «Металлургия», 1967. 190 с.
6. Рязанов Г. А. Опыты и моделирование при изучении электрического поля. М., «Наука», 1966. 210 с.

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБМЕНА ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ПРОВЕТРИВАНИИ КАРЬЕРОВ ОТ ИХ ГЛУБИНЫ И ОБЪЕМА ЗОНЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

При исследовании процессов искусственного проветривания карьеров широко применяется метод физического моделирования. Разработано большое количество методик моделирования, которые подробно разобраны в литературе [1]. По типу используемой среды их можно разделить на воздушное и гидравлическое моделирование.

В данной работе применялось гидравлическое моделирование, так как при исследовании распространения вредных примесей в больших по размерам объектах, характеризующихся относительно малыми скоростями воздушных потоков, этот метод по сравнению с воздушным моделированием обладает рядом преимуществ [2].

Проведенные эксперименты на гидромодели по изучению искусственного проветривания карьеров [3] позволили определить производительность, количество и местоположение средств проветривания в зависимости от высоты и объема зоны распространения примесей, от характера накопления примесей. Однако при этом не был затронут ряд таких важных вопросов, как определение зависимостей коэффициентов обмена от глубины карьера, а также необходимое число вентиляторов для проветривания при различном объеме зоны загрязнения. Одновременно рассмотрены:

— эффективность искусственного проветривания карьера при скоплении примесей в его атмосфере в зависимости от зоны их распространения;

— количество воздуха и времени, необходимых для проветривания карьера при скоплении примесей;

— производительность и количество вентиляторов, необходимых для проветривания.

При гидромоделировании для определения концентрации примесей был использован метод, основанный на изменении электропроводности раствора соли в зависимости от ее концентрации.

Безынерционность метода особенно важна при изучении быстро протекающих процессов проветривания.

Для имитации процессов загрязнения был использован 5% водный раствор сернокислого натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). При выборе количества  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , подаваемого в модель, исходили из условия что его минимальный объем при равномерном перемешивании в пределах всего карьерного пространства с заданной степенью точности (0,004%) определяется принятым методом анализа.

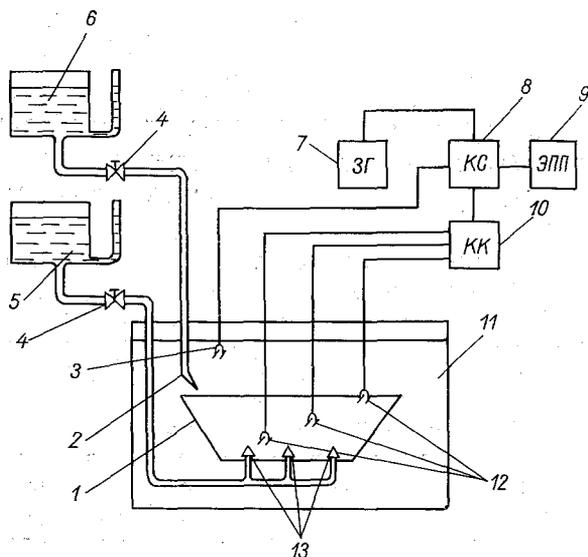


Рис. 1. Общая схема расположения оборудования на гидромодели.

1 — модель карьера, 2 — сопло для подачи воды, 3 — компенсационный датчик, 4 — вентили, 5 — загрязняющий раствор, 6 — распределительный бак, 7 — звуковой генератор, 8 — компенсационная схема, 9 — электронный потенциометр, 10 — коммутатор каналов, 11 — ванна с водой, 12 — датчики, 13 — распределительное устройство загрязнения (колпачки).

Датчики, используемые для определения концентрации раствора соли, представляют собой два электрода, изготовленных из нержавеющей стали в виде пластин размерами  $50 \times 5 \times 1$  мм. Расстояние между электродами составляет 80 мм. Увеличение базы датчиков по сравнению с применяемыми ранее [4] позволило осреднить значение концентрации раствора на большом расстоянии, что особенно важно при изучении процессов проветривания карьерного пространства.

Показания датчиков регистрировались электронным потенциометром ЭПП-09 на диаграммную ленту. Переключение трех датчиков, расположенных на различных высотах, производилось ав-

оматически при помощи коммутатора каналов. При изменении температуры растворов в показания приборов вводились поправки, определенные по методике, предложенной в [4].

Схема размещения оборудования на гидромодели показана на рис. 1.

При моделировании обеспечивалось соблюдение следующих условий:

- геометрическое подобие модели и природы;
- условия входа и выхода равны;
- характер потока турбулентный.

Принимая масштаб моделирования  $m = l_H/l_M = 1000$ , получаем следующие соотношения параметров, характеризующих процесс проветривания:

$$v_H = \sqrt{m}v_M = 31,6v_M,$$

$$Q_H = m^2\sqrt{m}Q_M = 31,6 \cdot 10^6 Q_M,$$

$$V_H = m^3V_M = 10^9 V_M,$$

$$t_H = \sqrt{m}t_M = 31,6t_M,$$

где  $v$  — скорость струи,  $Q$  — расход,  $V$  — объем проветриваемого пространства,  $t$  — время проветривания.

Модель карьера собрана из пластин органического стекла толщиной 10 мм. Пластины имитировали уступы карьера. Геометрические размеры модели приведены в табл. 1.

Исходные данные и условия проведения опытов сведены в табл. 2.

При моделировании модель карьера помещалась в ванну, которая заполнялась водой. Далее в карьерном пространстве создавалась зона загрязнения. Для проветривания использовались сопла в количестве от 1 до 4 диаметром 1,2 мм.

Опыты проведены с верхним расположением вентиляторных установок, так как оно, при нижнем распространении примесей, является наиболее эффективным [3].

Процесс проветривания изучался при различной глубине карьера. При этом отношения объема подаваемых вредных примесей к объему карьера поддерживались постоянными и составили  $1,53 \cdot 10^{-2}$  и  $3,06 \cdot 10^{-2}$ .

При определении коэффициентов обмена были рассмотрены следующие глубины:  $1/3H$ ;  $2/3H$  и  $H$ . Данные коэффициенты при 20-кратном разбавлении примесей составили соответственно 0,0375; 0,0512 и 0,0725. Их возрастание обусловлено в основном увеличением объема модели в 1,7 раза и продолжительности

Таблица 1

Геометрические размеры модели карьера

Высота, мм	Длина, мм		Ширина, мм	
	поверхность	дно	поверхность	дно
90	1060	840	690	470
170	1060	630	690	280
260	1060	440	690	70

работы вентиляторов в 5 раз, в то время как их производительность (табл. 3) оставалась одинаковой (опыты 13 и 14).

Как видно из рис. 2 (опыты 19 и 27), при суммарной производительности 525 м<sup>3</sup>/с использование двух или трех вентиляторов с дебитом соответственно 263 и 175 м<sup>3</sup>/с существенно изменяет условия проветривания. Значения коэффициентов обмена, полученные для данных случаев, при условии равного разбавления, соответственно составили 0,07 и 0,145.

Таблица 2  
Условия проведения опытов

	1/3H	2/3H	H
Глубина модели карьера, мм	90	170	260
Объем модели, л . . . . .	39	59,2	65,4
Объем подаваемых вредных примесей (5%-ного Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), л . . . . .	0,6 и 1,2	0,9 и 1,8	1 и 2
Диаметр сопла вентилятора, мм . . . . .		1,2	
Количество вентиляторов		1—4	
Количество воды, подаваемое на проветривание через один вентилятор, л/ч . . . . .		10; 20; 30	
Расположение вентиляторов		Верхнее	

Возрастание коэффициентов объясняется резким увеличением времени проветривания.

Данные закономерности подтверждаются также и другими опытами (опыты 5 и 13; 14 и 24; 17 и 25; 30 и 39; 32 и 43). Полученные результаты говорят о целесообразности сокращения общего количества вентиляторных установок, используемых в работе при ликвидации одновременного загрязнения.

В первом приближении количество вентиляторных установок должно приниматься из расчета [3]

$$n = \frac{L}{k'D_c}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина проветриваемой зоны;  $D_c$  — диаметр струи, создаваемой вентилятором;  $k'$  — коэффициент, учитывающий фактическую зону действия струи в пределах проветриваемого участка; для одиночной струи  $k'=2$ , для двух струй 1,6, для трех и более 1,2—1,3.

Таблица 3

## Относительное разбавление примесей при различных условиях проветривания и загрязнения

№ опыта	Объем карьера, л	Количество 5%-ного $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , л	Количество вентиляторов	Расход на один вентилятор, л/ч	Время проветривания, мин	Коэффициенты обмена, обеспечивающие 20-кратные разбавления в нижней зоне
1	65,4	2	4	10	10	0,0725
2	65,4	2	4	20	7	0,0950
3	65,4	1	3	10	20	0,1650
4	65,4	1	3	20	11	0,1025
5	65,4	1	3	30	4,5	0,0850
6	65,4	2	3	10	—	Не обеспечивает
7	65,4	2	3	20	13	0,1500
8	65,4	2	3	30	6	0,0800
9	65,4	1	2	10	—	Не обеспечивает
10	65,4	1	2	20	—	Не обеспечивает
11	65,4	1	2	30	11,5	0,1275
12	65,4	2	2	30	—	Не обеспечивает
13	65,4	1	1	30	10	0,0725
14	59,2	0,9	4	10	13	0,1175
15	59,2	0,9	4	20	5,5	0,0850
16	59,2	0,9	4	30	3,5	0,0950
17	59,2	0,9	3	20	8	0,1025
18	59,2	0,9	3	30	3	0,0600
19	59,2	1,8	3	20	10	0,1450
20	59,2	1,8	3	30	4	0,0775
21	59,2	1,8	4	20	7,5	0,1475
22	59,2	1,8	4	30	3,5	0,0975
23	59,2	0,9	2	10	7,0	0,0400
24	59,2	0,9	2	20	6	0,0775
25	59,2	0,9	2	30	3	0,0500
26	59,2	1,8	2	20	6	0,0650
27	59,2	1,8	2	30	5,5	0,0675
28	59,2	0,9	1	20	29	0,1000
29	59,2	0,9	1	30	30	0,1475
30	39,0	0,6	4	10	5	0,0675
31	39,0	1,2	4	10	—	Не обеспечивает
32	39,0	0,6	3	10	—	Не обеспечивает
33	39,0	0,6	3	20	3	0,0500
34	39,0	0,6	3	30	2,5	0,0775

№ опыта	Объем карьера, л	Количество 5%-ного Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , л	Количество вентиляторов	Расход на один вентилятор, л/ч	Время проветривания, мин	Коэффициенты обмена, обеспечивающие 20-кратные разбавления в нижней зоне
35	39,0	1,2	3	10	—	Не обеспечивает
36	39,0	1,2	3	20	3,5	0,0700
37	39,0	1,2	3	30	2,5	0,0925
38	39,0	0,6	2	10	—	Не обеспечивает
39	39,0	0,6	2	20	3	0,0500
40	39,0	1,2	2	20	10	0,1275
41	39,0	1,2	2	30	2	0,0250
42	39,0	0,6	1	20	14	0,0975
43	39,0	0,6	1	30	8	0,0875

По формуле (1) число вентиляторов, необходимых для проветривания, при глубине  $H$  равняется

$$n \leq \frac{440}{2 \cdot 261} \approx 1,$$

при глубине  $2/3H$

$$n \leq \frac{630}{1,6 \cdot 180} \approx 2.$$

Результаты расчетов подтверждались и при проведении опытов (опыты 13, 23 и 26).

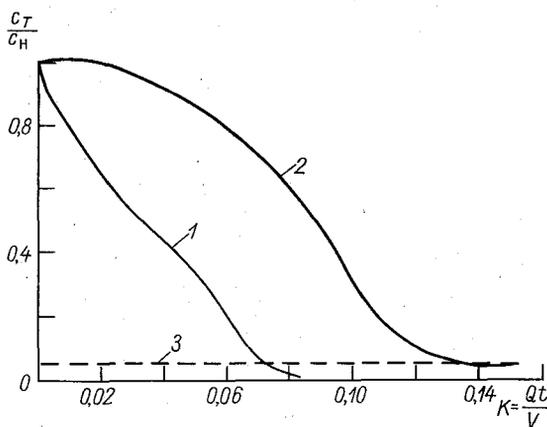


Рис 2. Эффективность проветривания при суммарной производительности вентиляторов 527 м³/с. 1 и 2 — соответственно при дебите на один вентилятор 263 и 176 м³/с, 3 — уровень 20-кратного разбавления.

Расчетное  $n$  при  $1/3 H$  равно

$$n \leq \frac{840}{1,3 \cdot 91} \approx 6.$$

Экспериментальное  $n$  было определено равным 2 (опыты 39 и 41).

Это говорит о том, что при небольшой глубине карьера ( $1/3 H$ ) данная формула не подходит, так как несмотря на то, что диаметр струи уменьшается, скорость ее в проветриваемой зоне резко возрастает, в результате чего происходит более интенсивное перемешивание воздушных масс и количество вентиляторов по сравнению с расчетным уменьшается.

Эффективность вентиляции повышается с ростом скорости движения воздуха в проветриваемой зоне. Однако она не должна превышать 3 м/с, так как дальнейшее увеличение скорости приведет к нежелательным последствиям (поднятию пыли, созданию неприятных ощущений у работающих людей и т. п.). Увеличение скорости возможно за счет большей производительности вентиляционных установок. Ее рост возможен при увеличении общего дебита воздуха, подаваемого в карьер, и в результате сокращения числа вентиляционных установок при одновременном увеличении их производительности. При этом должны быть согласованы между собой размеры проветриваемой зоны и создаваемых свободных струй с таким расчетом, чтобы каждая струя имела полное раскрытие и не накладывалась на соседние.

Во время проведения опытов изучалось также количество вентиляторов, необходимых для проветривания, при различном объеме зоны загрязнения. Результаты опытов, при различной глубине карьера показаны на рис. 3.

Можно заметить, что при уменьшении зоны загрязнения число вентиляторов, необходи-

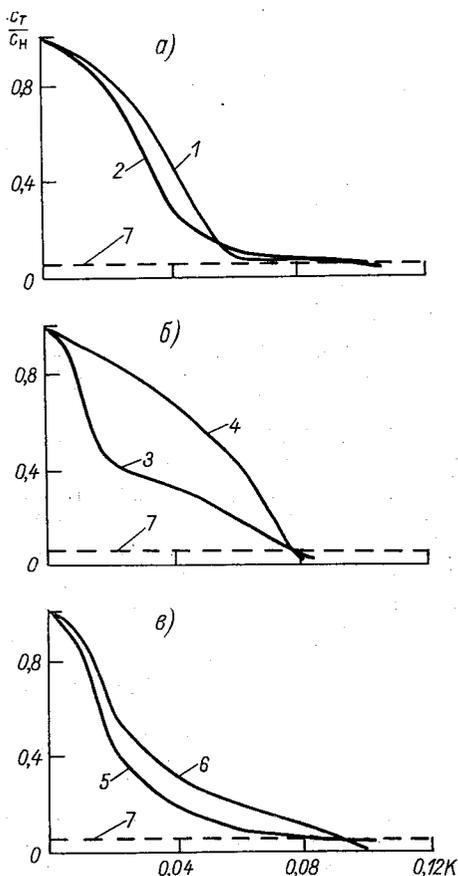


Рис. 3. Эффективность проветривания в зависимости от объема зоны загрязнения при различной глубине карьера.

а — глубина карьера  $1/3 H$ , б —  $2/3 H$ , в —  $H$ ;  
 1 — загрязнение  $0,6 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=1$ ; 2 —  $1,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=3$ ;  
 3 —  $0,9 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=2$ ; 4 —  $1,8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=3$ ;  
 5 —  $1,0 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=3$ ; 6 —  $2,0 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ,  $n=4$ ;  
 7 — уровень 20-кратного разбавления.

мых для проветривания, убывает, в то время как их производительность остается постоянной, а иногда даже и уменьшается (кривые 3 и 4, производительность одного вентилятора 176 и 263 м<sup>3</sup>/ч соответственно). Это обусловлено в первую очередь уменьшением количества воздуха, необходимого для проветривания.

В процессе проветривания при уменьшении зоны загрязнения и снижения концентрации примесей возможно сокращение количества вентиляционных установок.

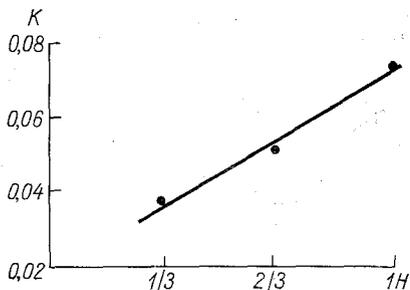


Рис. 4. Зависимость коэффициентов обмена от глубины карьера.

Материалы экспериментальных исследований гидравлической модели карьера с одновременным загрязнением при различной глубине карьера позволяют сделать следующие выводы.

1. При увеличении глубины карьера коэффициенты обмена (рис. 4) возрастают по линейному закону,  $K=0,02+0,049 N$ .

2. С увеличением глубины карьера с  $1/3N$  до  $N$  время проветривания возрастает в 5 раз.

3. При ликвидации единовременного загрязнения целесообразно сокращение общего количества вентиляционных установок. Наиболее рациональным количеством является два вентилятора.

4. В процессе проветривания при уменьшении зоны загрязнения и снижении концентрации примесей возможно сокращение общего числа вентиляционных установок при сохранении постоянной суммарной производительности их.

5. При выборе схемы проветривания следует учитывать глубину карьера, а также объем зоны загрязнения и в соответствии с этим определять необходимое число вентиляторов и режим их работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульяновский С. В., Кудрявцев Е. В., Гинзбург Л. И. Создание и развитие метода моделирования в отопительно-вентиляционной технике в СССР.— «Водоснабжение и санитарная техника», 1967, № 7, с. 1—7.
2. Талиев В. Н. Приближенное моделирование систем вентиляции зданий.— «Сб. НИИ санитарной техники», 1959, № 3, с. 190—204.
3. Битколов Н. З. Исследование механизма естественного, обоснование и расчет искусственного проветривания карьеров.— Автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М., МГИ, 1972. 40 с.
4. Вишневский Е. П., Хирви В. А. Методика кондуктометрических измерений при исследовании систем вентиляции на гидромоделях.— «Водоснабжение и санитарная техника», 1969, № 8, с. 25—29.

Ю. В. ГУЛЬ, Л. Н. ПОЛЫНЦЕВ

## ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОХРАНЫ АТМОСФЕРЫ В РАБОЧИХ ЗОНАХ КАРЬЕРА ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

При отработке месторождений полезных ископаемых в последние годы нашел применение комбинированный способ разработки, включающий комплексы открытых и подземных горных работ. При этом способе наиболее целесообразно используются запасы недр, обеспечиваются высокие технико-экономические показатели и максимальная производительность предприятия [1]. В зависимости от очередности открытых и подземных работ комбинированные способы разделяются на три группы.

К первой группе относятся месторождения, разрабатываемые на первой стадии открытым способом с последующим переходом на подземные работы. Вторая группа включает месторождения, на которых в первый период ведутся подземные работы, а затем осуществляется переход к открытым работам. К третьей группе относятся месторождения, которые в течение продолжительного периода одновременно разрабатываются открытым и подземным способами.

Кроме последовательности отработки месторождения во времени, комбинированные способы делятся на два основных типа по пространственному признаку [2].

Первый тип — месторождение разрабатывается открытым и подземным способами в одной вертикальной плоскости. Второй тип — месторождение разрабатывается по простиранию в пределах всего рудного тела одновременно открытым и подземным способами, т. е. работы ведутся с совмещением в горизонтальной плоскости.

К числу преимуществ комбинированного метода относят [3]: 1) совместное вскрытие шахтного и карьерного полей подземными выработками с выдачей руды из карьера и шахты по единой транспортной магистрали; 2) комплексное использование подземных выработок (с целью дренажа, подачи электроэнергии, спуска

и подъема людей в карьер, проветривания, ускоренной подготовки шахтных полей).

В основе выбора комбинированного метода разработки месторождений полезных ископаемых находится целевая функция, определяющая экономические интересы предприятия. Ее общий вид можно представить в форме

$$\sum Z_p - \sum Z_c \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\sum Z_p$ ,  $\sum Z_c$  — приведенные затраты соответственно при раздельном и совместном вскрытии шахтного и карьерного полей, руб.

При разработке месторождений в условиях Крайнего Севера примерами комбинированного способа являются системы: карьер Медвежий Ручей — рудник Заполярный (Норильский, ГМК), карьер Центральный Ждановского рудника — рудник Северный, рудники и карьеры Котсельваара и Каула (комбинат Печенганикель) и др.

Следует отметить, что в проектных решениях по комбинированному способу разработки уделяется недостаточное внимание санитарно-гигиеническим требованиям к атмосфере в рабочих местах подземной и открытой частей предприятия.

Технологическая связь открытой и подземной частей предполагает их аэродинамическую связь с неизбежным обменом вредными примесями. Как известно, случаи повышенной устойчивости атмосферы в карьерном пространстве сопровождаются аккумуляцией в нем вредных примесей. Поэтому при направлении движения воздуха из карьера в подземные выработки эти моменты характеризуются интенсивным заносом вредностей в подземную часть, и, наоборот, при движении воздуха из подземной части в карьер последний приобретает дополнительный источник загрязнения атмосферы. Очевидно, во втором случае с карьером должна быть связана ветвь подземной вентиляционной сети, отличающаяся незначительной интенсивностью источников вредных примесей. В пользу второго случая могут быть приведены изложенные ниже обоснования.

Поскольку основным показателем устойчивости атмосферы в карьерном пространстве является ее тепловой дефицит по отношению к внешней среде, комбинированный метод отработки месторождений полезных ископаемых обнаруживает возможность использования теплового потенциала подземных выработок и вмещающих горных пород для компенсации указанного теплового дефицита в карьерном пространстве с целью усиления его воздухообмена с окружающей средой.

Впервые предложение об использовании теплового потенциала горных пород с помощью специальных горных выработок для интенсификации воздухообмена в карьерном пространстве было сделано Н. З. Битколовым. Реализация же данного предложения в условиях комбинированного метода отработки месторождения

позволяет ограничиться весьма небольшими капитальными затратами.

Необходимость искусственного вмешательства в состояние атмосферы карьеров Крайнего Севера, как правило, связана с зимними периодами. В зимнее время в северных районах наблюдаются дефицит энергии солнечной радиации, антициклонические штили и интенсивная потеря энергии приземным слоем в результате эффективного излучения поверхности земли.

Для подтверждения возможности использования предлагаемого метода проводились одновременные наблюдения за изменением вертикального температурного градиента в карьере Каула и Котсельваара, сопряженных с подземными горными работами и находящимися на незначительном расстоянии друг от друга. Карьер Котсельваара изолирован от подземных работ плотными перемышками, карьер же Каула связан с подземными работами через неплотности обрушенного пространства. Нагнетательная схема проветривания подземных выработок на руднике Каула вызывает непрерывный выход воздуха в карьерное пространство в количестве  $5290 \text{ м}^3/\text{мин}$  с температурой  $8-10^\circ\text{C}$ .

Замеры температуры в период инверсионного состояния окружающей среды показали существенную разницу в температурной стратификации указанных карьеров. На рис. 1 приводятся данные наиболее характерных замеров, где наглядно представлено отсутствие инверсионного состояния в карьере Каула, в то время как оно имело место в карьере Котсельваара (рис. 1 а). Известно, что при положительном градиенте стратификации атмосферы в карьерах происходит турбулентный обмен между слоями, достаточный для интенсивного выноса вредных примесей. На рисунке приводятся также данные замеров в указанных карьерах при отсутствии инверсионных состояний (рис. 1 б).

Поскольку управление открытым и подземным рудниками при комбинированном способе находится в руках одного комбината, справедливо поставить вопрос об оптимизации систем их проветривания. Аналогично общей целевой функции (1) экономическая функция систем проветривания может быть представлена как

$$\sum Z_{\text{вр}} - \sum Z_{\text{вс}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $\sum Z_{\text{вр}}$  и  $\sum Z_{\text{вс}}$  — приведенные затраты на вентиляцию подземного

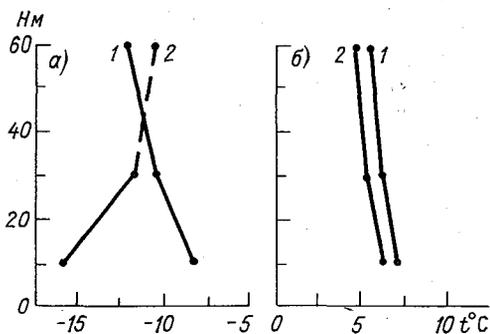


Рис. 1. Температурная стратификация атмосферы карьеров Каула (1) и Котсельваара (2) в идентичных метеорологических условиях.

и открытого рудников при раздельном и совместном режимах проветривания.

Таким образом, можно заключить, что режим организации совместной вентиляции может быть оправдан, если он по затратам существенно отличается (т. е. экономичен) от режима раздельной вентиляции. При этом задача сводится к поиску условий, при которых

$$\sum Z_{\text{вс}} \rightarrow \text{млп.} \quad (3)$$

Поскольку на выпускаемый в карьерное пространство воздух накладывается условие незначительной загрязненности (в пределах ПДК), следует выбрать такую ветвь в сети подземных выработок, которая, минуя основные источники загрязнений, надежно могла бы обеспечить поставленное условие (3). Это означает учет и минимизацию дополнительных расходов на подземную вентиляцию, которые обозначим через  $\Delta Z_{\text{п}}$ . Поскольку выдача воздуха в карьерное пространство связана с необходимостью проведения специальных выработок, имеет смысл учесть и эту статью расходов в виде  $Z_{\text{выр}}$ . Так как предлагаемый способ предусматривает проветривание карьерных пространств в зимнее время, то появляется статья затрат работы вентилятора против естественной тяги  $Z_{\text{е.т}}$ .

Таким образом, затраты на выдачу воздуха в карьерное пространство с целью его проветривания могут быть представлены как

$$Z_0 = \Delta Z_{\text{п}} + Z_{\text{выр}} + Z_{\text{е.т.}} \quad (4)$$

Эти затраты являются оправданными в рамках проблемы проветривания карьера, если их общее значение меньше затрат на генерацию такого же количества тепла в карьерном пространстве другими способами  $Z_{\text{н}}$ , т. е. необходимо условие

$$Z_0 < Z_{\text{н}} \quad (5)$$

На уровне же общих экономических интересов предприятия целесообразность изложенных идей может быть подтверждена при решении более сложной экономико-математической модели, подчиняющейся требованию (1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научные основы проектирования карьеров. Под ред. В. В. Ржевского. М., Недра, 1971. 596 с.
2. Щелканов и др. Перспективы применения комбинированных способов разработки железорудных месторождений.—«Тр. ин-та горного дела МЧМ СССР», 1972, вып. 39, с. 118—127.
3. Щелканов В. А., Денисов Е. М., Чвялева Н. И. Экономико-математическая модель совместного вскрытия шахтного и карьерного полей подземными выработками.—«Тр. ин-та горного дела МЧМ СССР», 1972, вып. 39, с. 97—105.

Многообразие факторов, управляющих движением неизоотермической струи в реальной атмосфере, делает практически невозможным создание ее строгих математической модели. В связи с этим широкое распространение получают упрощенные модели струи, основанные на интегральных балансовых соотношениях [5—7]. Численная схема представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка и позволяет рассчитывать на ЭВМ осредненные по сечению струи основные характеристики — составляющие скорости движения, температуру, радиус, секундную массу (расход воздуха), а также целый ряд микрофизических параметров струи. При этом стратегия расчета атмосферы карьера, а также исходные параметры струи на срезе сошла двигателя считаются заданными (либо известными из опытных данных). Сравнение результатов расчета с экспериментом, выполненным в широком диапазоне лабораторных и натуральных условий [8, 9], показывают вполне удовлетворительное их совпадение.

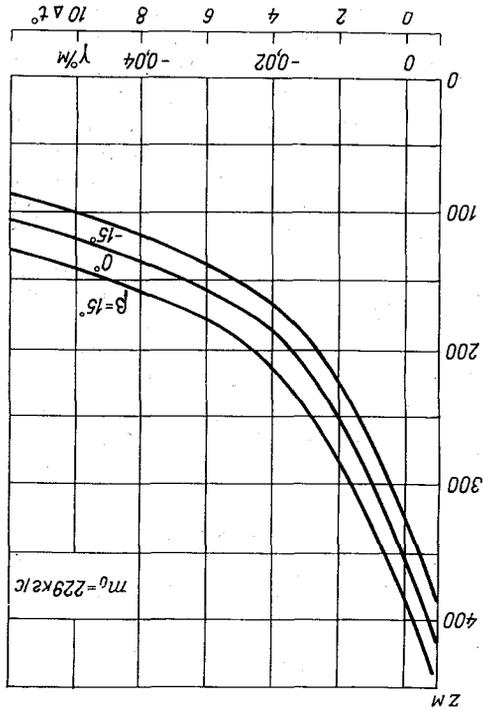
### Определение параметров неизоотермической струи универсальной вентиляционной установки при различных метеорологических условиях в карьере

Использование энергии движения свободных турбулентных струй является в настоящее время единственным практически реализуемым способом вентиляции карьеров. Различные аспекты этой проблемы обсуждаются в [1, 3, 4, 8]. Метеорологические же условия, от которых зависит выбор конкретной схемы вентиляции, в указанных работах учитываются недостаточно полно. В настоящей работе обсуждается выбор способа и схем вентиляции карьеров с учетом влияния стратегии вентиляции и ветра на распространение струи и загрязняющих веществ.

### О ВЫБОРЕ СПОСОБА И СХЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

В. З. БУХМАН, Б. М. ВОРОБЬЕВ, Л. А. КОЗАКОВ

Рис. 1. Максимальная высота подъема струи ВВУ в зависимости от вертикального градиента температуры в карбаре при различных исходных углах наклона струи (с ложиганием).



При расчете внешние условия в атмосфере карьера варьировались в следующих пределах: температура воздуха ( $t_0$ ) на исходном уровне — от 0 до  $-20^{\circ}\text{C}$ ; вертикальный температурный градиент ( $\gamma = \frac{dt}{dz}$ ) — от  $+0,005$  до  $-0,060^{\circ}/\text{м}$ ; диаметр ветра — от 0 (штиль) до  $0,025 \text{ м/с} \cdot \text{м}^{-1}$ ). Исходное к горнзону направление движения струи варьировалось в диапазоне от  $-15$  до  $15^{\circ}$ . Вне зоны действия ветра, как было показано ранее [8], струи становятся малоэффективными для вентиляции.

Искусственное проветривание карбара свободными турбулентными струями оснoвано, как известно, на способности последних «оживлять» (вовлечь в себя) окружающий загрязненный воздух. В связи с этим будем рассматривать лишь те характеристики струи, которые оказывают самое непосредственное влияние на процесс вентиляции:

1) высоту подъема, 2) скорость подъема, 3) траекторию движения струи.

Режим двигателя	Радиус $R_0 \text{ м}$	Перепад $\Delta T^{\circ}$	Скорость $v_0 \text{ м/с}$	Расход воздуха $m_0 \text{ кг/с}$
Без ложигания	0,575	530	500	229
С ложиганием	0,575	330	300	183

Исходные параметры струи ВВУ

Таблица 1

Ниже приводятся основные результаты выполненных на ЭВМ расчетов параметров струи, создаваемых турбоактивными установками типа ВВУ (универсальная вентиляцияная установка). Начальные параметры таких струй на срезе сопла при двух различных режимах работы двигателя представляются в табл. 1.

Знание первой характеристики необходимо для принятия первоначального решения о принципиальной возможности проветривания карьера путем выноса за его пределы загрязненного воздуха. Вторая характеристика, от которой, как будет показано ниже, в значительной мере зависит время вентиляции, определяет эффективность применяемого способа проветривания. Что касается траектории движения струи, то она может служить дополнительной характеристикой, необходимой, в частности, при рассмотрении вопроса о рациональном размещении одного или нескольких двигателей УВУ на дне или борту карьера.

Судя по результатам расчетов, из всего многообразия внешних факторов, управляющих характером движения струи УВУ, наиболее сильно действующим является вертикальный температурный градиент. Остальные внешние факторы, в частности температура наружного воздуха на уровне двигателя, а также сдвиг ветра, с достаточной для практики точностью можно не учитывать при определении параметров струи УВУ.

Помимо внешних факторов, существенное влияние на движение струи могут оказывать и ее исходные параметры — перегрев, скорость истечения воздуха, диаметр сопла, положение оси двигателя.

На рис. 1 представлены результаты расчетов параметров струи УВУ применительно к задаче определения максимальной высоты ее подъема. По вертикали здесь отложены значения высоты подъема струи, по горизонтали — значения вертикальных градиентов температуры, а также соответствующие им перепады температур дно — поверхность для карьеров глубиной 200 м. Цифры у кривых — значения углов наклона оси двигателя к горизонту. Кривые рассчитаны для случая штилевой атмосферы при температуре у дна карьера, равной  $0^{\circ}\text{C}$ , однако по причинам, указанным выше, они могут служить рабочей номограммой для определения максимальной высоты подъема струи УВУ и во всем диапазоне метеорологических условий в карьере.

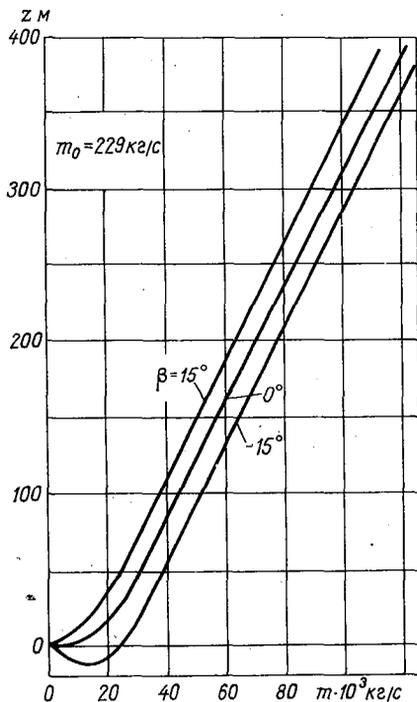


Рис. 2. Изменение секундной массы струи УВУ с высотой при различных исходных углах наклона струи (с дожиганием).

Результаты расчетов секундной массы ( $m$ ) струи в функции высоты ее подъема показаны на рис. 2. Как видно, струи УВУ так быстро вовлекают в себя окружающий воздух, что уже в непосредственной близости от сопла двигателя их секундная масса в десятки раз превышает исходное значение, так что струя здесь практически целиком состоит из окружающего загрязненного воздуха. Отметим еще одну закономерность в поведении кривых

Таблица 2

Численные значения коэффициентов связи в соотношении  $m - z$  для струй УВУ

	Углы наклона оси струи		
	+15°	0°	-15°
С дожиганием ( $m_0=229$ кг/с)			
$a_0$ кг/с	13 000	21 000	31 000
$a_1$ кг/с·м	246	246	246
Без дожигания ( $m_0=183$ кг/с)			
$a_0$ кг/с	7500	13 000	19 200
$a_1$ кг/с·м	178	178	178

$m(z)$ . Начиная с некоторого уровня, который определяется исходным углом наклона оси струи, приращение с высотой массы струи

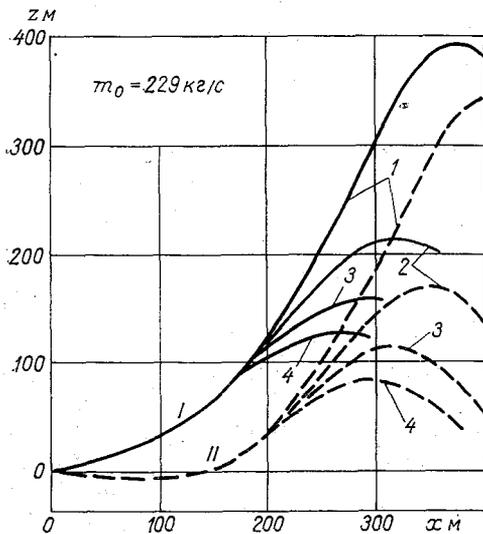


Рис. 3. Траектории оси УВУ (с дожиганием) при различных температурных условиях в карьере и в зависимости от угла наклона струи.

- 1)  $\gamma = 0^\circ/\text{м}$ ; 2)  $\gamma = -0,02^\circ/\text{м}$ ; 3)  $\gamma = -0,04^\circ/\text{м}$ ; 4)  $\gamma = -0,06^\circ/\text{м}$ .

происходит с постоянной скоростью, что дает возможность аппроксимировать кривую  $m(z)$  выражением

$$m(z) = a_0(m_0) + a_1(m_0)z, \quad (1)$$

где  $a_0(m_0)$  — коэффициент, численно равный массе струи на высоте 20 м от ее исходного уровня;  $a_1(m_0)$  — коэффициент, численно равный скорости изменения с высотой секундной массы.

Численные значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  представлены в табл. 2.

Представленные на рис. 2 и в табл. 2 данные соответствуют заданным в расчетах условиям, в частности, они справедливы для изотермического состояния атмосферы. Расчеты, однако, показывают, что и при других метеорологических

условиях характер зависимости и абсолютные значения  $m(z)$  полностью сохраняются. Нужно лишь помнить о существовании предельной высоты подъема струи в зависимости от вертикального температурного градиента (см. рис. 1).

На рис. 3 показаны траектории оси струи УВУ при различных температурных условиях в карьере. Семейство кривых *I* соответствует исходному углу наклона струи, равному  $-15^\circ$ , а семейство кривых *II* — результатам расчета траектории струи при  $\beta = -15^\circ$ . Расчеты выполнены для штилевых условий при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Заметим еще раз, что изменение указанных условий практически не влияет на траекторию движения струи.

### Выбор способа и схем вентиляции карьера

Выбор способа и схем вентиляции определяется [3, 4] параметрами струи, распределением вредных примесей в атмосфере карьера, а также действием источников.

Отсутствие надежных данных о концентрации вредных примесей привело к необходимости использовать в качестве первого приближения так называемые «характерные» вертикальные профили концентрации вредных примесей (табл. 3). Они получены на основании измерений в Сибайском карьере метеорологических параметров у дна и на поверхности, измерений концентрации вредных примесей у дна и одновременной качественной оценки интенсивности загрязнений.

На рис. 4 представлены характерные профили концентрации вредных примесей, а также указана их связь со значениями вертикальных градиентов температуры над центром карьера и соответствующих им перепадов температур поверхность — дно для

Таблица 3

Характерные вертикальные профили концентрации вредных примесей

Профиль	Качественная характеристика загрязнения	$\gamma^{\circ}/100 \text{ м и } \tilde{c}'$	Примерные значения концентрации $\tilde{c}$ на высотах, м				
			2	10	50	100	200
<i>I</i>	Слабое ( $V_3 < 1/3 V_K$ )	$0 < \gamma_{0-200} < 0,65;$ $\tilde{c}'_{0-50} \leq 1$	4,20	2,80	0,50	0,10	0,01
<i>Ia</i>	Умеренное ( $V_3 < 1/2 V_K$ )	$-0,5 < \gamma_{0-200} < 0,0;$ $2 > \tilde{c}'_{0-100} > 1,0$	4,20	2,39	1,00	0,50	0,15
<i>II</i>	Сильное ( $V_3 > 1/2 V_K$ )	$-2,0 < \gamma_{0-200} <$ $< -0,5; \tilde{c}'_{0-150} > 2$	3,00	6,10	4,90	1,70	0,10
<i>III</i>	Очень сильное (весь карьер)	$\gamma_{0-200} < -2,0;$ $\tilde{c}'_{0-400} > 2,0$	4,20	11,40	12,60	5,30	0,60

Примечание.  $\tilde{c}'$  — средняя безразмерная концентрация в слое.

карьера глубиной 200 м. Причем профили II и III отражают возможное наличие приподнятых инверсий внутри карьера, а профили IIa и IIIa относятся к случаям, когда инверсии наблюдаются от дна карьера.

Перейдем теперь к вопросу о выборе способа и схем вентиляции. Все применяемые способы проветривания можно разделить на следующие:

1) способ «перемешивания», при котором добиваются выравнивания концентрации вредных примесей во всем объеме или в части объема карьера;

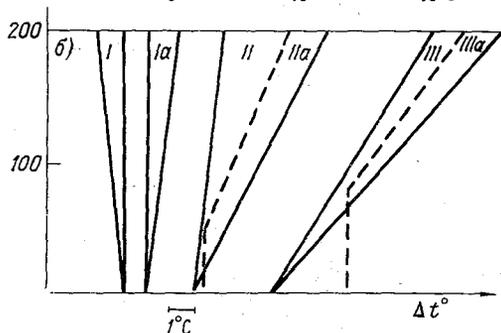
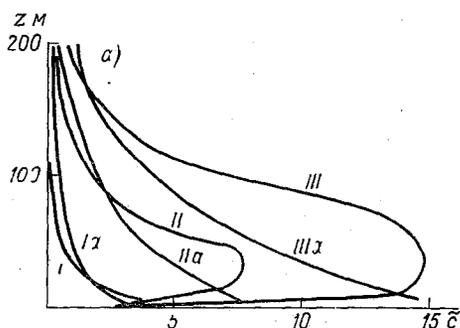


Рис. 4. Типовые вертикальные профили. а) концентрация вредных примесей, б) разность температур (соответствующая изменению концентрации вредных примесей)  $\Delta t = t_{II} - t_{д}$ .

жения заданного значения концентрации вредных примесей, меньше глубины карьера, то «перемешивание» целесообразно. В противном случае необходимо применять способы «на вынос» или «комбинированный». В этих случаях определяется необходимая высота выноса загрязненного воздуха по формуле

$$H_{\text{необх}} = H_{\text{к}} - h_{\text{уст}} + h_{\text{пр}},$$

где  $H_{\text{к}}$  — глубина карьера,  $h_{\text{уст}}$  — высота места установки двигателя,  $h_{\text{пр}}$  — превышение высоты подъема струи над бортом карьера.

2) способ „на вынос” — в этом случае загрязненный воздух удаляется за пределы карьера;

3) комбинированный способ, когда в некотором объеме карьера воздух перемешивается, а начиная с какого-то уровня выносятся за пределы карьера.

Выбор способа „перемешивания” основывается в общем случае на оценке необходимой высоты карьера, до которой нужно перемешать воздух, чтобы снизить среднюю концентрацию вредных примесей до значений, меньших ПДК [4]. Конкретная же схема проветривания должна выбираться с учетом параметров струи, определяемых, как было показано выше, в зависимости от метеорологических условий в атмосфере карьера.

Если высота, до которой необходимо перемешивать воздух в карьере для дости-

ера. Значение  $h_{пр}$  определяется по методу, аналогичному расчету высоты труб [2]. По величине  $H_{необх}$  выбирается схема вентиляции (место установки, режим работы и наклон оси двигателя), обеспечивающая подъем струи на эту высоту при данных метеорологических условиях. При выборе схемы проветривания одновременно с этим необходимо оценивать и время вентиляции. Оно рассчитывается по методике, изложенной в работах [3, 4].

В качестве примера рассмотрим результаты расчетов времени вентиляции Сибайского карьера ( $H_k=200$  м;  $V_k=120$  млн. м<sup>3</sup>)

Таблица 4

**Время вентиляции Сибайского карьера  
при различных метеорологических условиях**

Характерные профили концентрации вредных примесей	$m_0=183$ кг/с		$m_0=229$ кг/с	
	$\tau$ мин	$m^*$ кг/с	$\tau$ мин	$m^*$ кг/с
$\beta=15^\circ, h_4=50$ м				
I	70	5000	40	10000
II	120	5000	70	10000
III	158	26000	94	39000
$\beta=-15^\circ, h_4=50$ м				
I	36	17010	26	30000
II	36	17000	30	30000
III	92	46000	85	58000

при работе одной установки УВУ и расходе воздуха ( $m^*$ ) в струе на характерном уровне. Под характерным уровнем понимается высота, выше которой исходная концентрация вредных примесей меньше ПДК.

Результаты расчетов для двух режимов работы установки УВУ приведены в табл. 4. Как следует из рассмотрения таблицы, время вентиляции существенно зависит от характерного профиля концентрации вредных примесей и возрастает более чем в два раза при переходе от слабого к сильному загрязнению. Большое влияние на время вентиляции оказывает начальная секундная масса струи и угол, под которым струя направлена в карьер. При  $m_0=229$  кг/с и  $\beta=-15^\circ$  необходимое время вентиляции оказывается минимальным. Как указывалось, для успешного осуществления вентиляции необходимо, чтобы высота подъема струи превышала уровень, где концентрация вредных примесей меньше ПДК. Если это условие не выполняется и одна установка УВУ не обеспечивает вентиляцию, выбирают схемы с использованием одновременной работы двух установок.

Для практического определения времени вентиляции служит номограмма (рис. 5). Кривые *I* и *II* представляют собой изменение времени вентиляции в функции от значения секундной массы струи УВУ на характерном уровне, равном для *I* и *II* профилей 60 м над дном карьера, а кривые *III* и *III'* — в функции от значения  $m^*$  на уровне 180 м, или от среднего значения  $\bar{m}^*$  на уровнях 50 и 180 м.

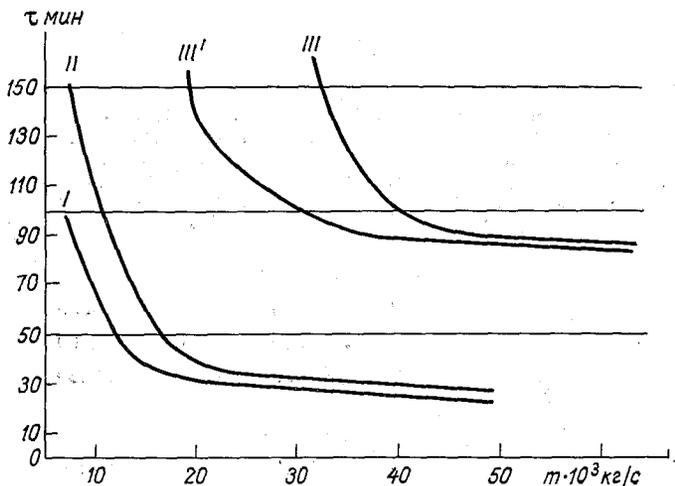


Рис. 5. Номограмма для определения времени вентиляции в зависимости от характерного профиля загрязнения и величины секундной массы струи.

Развитый в настоящей работе подход может быть применен и для других карьеров и установок при условии выполнения аналогичных расчетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973. 184 с.
2. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеондат, 1970. 342 с.
3. Козаков Л. А. Учет влияния распределения примесей на эффективность искусственного проветривания карьеров.—«Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 64—72.
4. Козаков Л. А. Расчеты вертикального профиля концентрации загрязняющих веществ и оценка возможностей ее уменьшения путем перемешивания воздуха в карьерах.—«Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 112—116.
5. Качурин Л. Г., Бекряев В. И., Дыдина Г. П. Траектория турбулентных нагретых затопленных струй в атмосфере.—«Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1964, № 12.

6. Бекряев В. И. Турбулентная неизотермическая струя в стратифицированной атмосфере.—«Тр. ЛГМИ», 1972, вып. 45, с. 62—72.
7. Воробьев Б. М. К расчету искусственной кристаллизации мелкокапельных мощных кучевых облаков.—«Тр. ЛГМИ», 1972, вып. 45, с. 108—116.
8. Бухман Я. З., Бекряев В. И. Расчет распространения турбулентных струй при проветривании глубоких рудных карьеров.—«Сб. работ Свердловской ГМО», 1970, вып. 10, с. 56—62.
9. Качурин Л. Г. и др. Некоторые вопросы фазовых переходов воды в атмосфере применительно к проблеме управления градовыми процессами.—«Тр. ВГИ», 1969, вып. 14, с. 64—76.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ГАЗОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ИЛИ ИСКУССТВЕННОМ ПРОВЕТРИВАНИИ КАРЬЕРОВ

До настоящего времени в большинстве известных работ [1, 2 и др.] для оценки эффективности или необходимого времени проведения искусственной вентиляции, или для оценки действия естественного проветривания рассматриваются весьма упрощенные модели. В них в качестве исходных данных для расчетов используются средние по всему карьеру или по его части значения концентраций загрязняющих газов. Объемы воздуха, вносимые или выносимые с помощью вентиляции, рассматриваются только на верхней границе загазованного воздуха. Такая схематизация вносит существенные неточности в производимых оценках, так как концентрация загрязнения и масса выносимого воздуха (при любом расположении вентиляторов) сильно зависят от высоты.

В работах [3, 4] при определении изменения вертикального профиля загрязнений со временем в процессе вентиляции принималось, что концентрация загрязняющих газов  $c=c(z)$  и секундная масса в сечении струи  $m=m(z)$ , но не учитывались действие источников в процессе вентиляции и эффект турбулентного переноса массы воздуха по вертикали.

Предлагаемая ниже схема численного решения уравнения диффузии учитывает эти факторы. Она позволяет при задании интенсивности плоского источника, начального профиля концентрации  $c|_{t=0}=c(0, z)$ , изменения сечения карьера с высотой  $S(z)$  и секундной массы струи как функции высоты  $m(z)$  найти профиль коэффициента турбулентного обмена  $K_z=K_z(z)$  и, полагая его неизменным в течение действия вентиляции, рассчитать  $c(t, z)$ . При этом форма карьера аппроксимируется перевернутым обелиском или усеченным конусом.

В приведенных выше обозначениях уравнение диффузии имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right), \quad 0 \leq z \leq l, \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} c|_{t=0} &= c(0, z) = c' z \beta e^{-\alpha z}, \\ -k_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} &= Q, \quad c|_{z=l} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $c=c(t, z)$  — концентрация загрязняющего газа в кубометре воздуха в момент времени  $t$  и на высоте  $z$ ;

$$w = m(z)/\rho S(z), \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха  $m(z)$  — секундная масса струи,  $S(z)$  — площадь горизонтального сечения на высоте  $z$ . Для определения  $c(z)$  в случае искусственной вентиляции задается  $m(z)$  и  $S(z)$ , а при естественном проветривании следует задать среднее по сечению карьера значение скорости опускания воздуха  $w(z)$ .

Коэффициент турбулентности  $K_z$  определяется из соотношения

$$K_z(z) = -Q \frac{\partial c(0, z)}{\partial z}. \quad (4)$$

Выражение для  $S(z)$  через данные карьера имеет вид

$$S(z) = \pi \left[ (l_1 - l_2) \frac{z}{H} + l_2 \right]^2, \quad (5)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — радиусы или горизонтальные размеры верхнего и нижнего оснований соответственно,  $H$  — высота карьера; если  $z > H$ , то  $S(z)$  полагается равной  $S(H)$ .

Для  $K_z$  накладывается следующее ограничение: если в момент времени  $t$  и при  $z > z_0$   $K_z < 0,001$ , то  $K_z$  полагается равным  $K_z(z_0)$ .

Решение данного дифференциального уравнения с частными производными проводится методом конечных разностей [5]. Конечно-разностная схема для данного уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\tau} - w_i \left[ \lambda \frac{c_{i+1}^{n+1} - c_i^{n+1}}{h} + (1 - \lambda) \frac{c_i^{n+1} + c_{i-1}^{n+1}}{h} \right] = \\ = \frac{1}{h} \left( K_{zi+1/2} \frac{c_{i+1}^{n+1} - c_i^{n+1}}{h} - K_{zi-1/2} \frac{c_i^{n+1} - c_{i-1}^{n+1}}{h} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

для граничных условий вводится следующая аппроксимация:

$$\frac{c_1^{n+1} - c_0^{n+1}}{h} = -\frac{Q}{K_z(0)}, \quad c_m^{n+1} = 0,$$

Здесь  $i=1, 2, 3, \dots, m-1$ ;  $c_i^n = c(n\tau, ih)$ ;  $h=l/m$  — шаг по высоте ( $m$  — число шагов);  $\tau$  — шаг по времени;  $\lambda$  — некоторое число ( $0 < \lambda < 1$ ).

Для определения начального профиля концентрации следует задать значения  $c$  на трех высотах:  $z_1, z_2$  и  $z_3$ , по которым для нахождения  $c', \alpha$  и  $\beta$  решается система уравнений вида  $c'e^{-\alpha z_i} z_i^\beta = y_i, i=1, 2, 3, y_1, y_2$  и  $y_3$  — соответствующие значения концентрации на высотах  $z_1, z_2$  и  $z_3$ .

После преобразований системы уравнений, полученных по конечно-разностной схеме, будем иметь

$$\begin{aligned} & \tau(K_{zi+1/2} - h\tau_i \lambda) c_{i+1}^{n+1} + [-\tau(K_{zi+1/2} + K_{zi-1/2}) - \\ & - \tau h\tau_i(1 - 2\lambda) - h^2] c_i^{n+1} + \tau[K_{zi-1/2} + h\tau_i(1 - \lambda)] c_{i-1}^{n+1} = -h^2 c_i^n, \\ & c_0^{n+1} = c_1^{n+1} + Q/K_z(C), \quad c_m^{n+1} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m-1. \end{aligned} \quad (7)$$

Данную систему линейных алгебраических уравнений в силу того, что она трехдиагональная, целесообразно решать методом прогонки [6]. Во всех рассмотренных вариантах  $\lambda$  полагалось равным 1.

В некоторых вариантах решения задачи функция задавалась не указанным выше способом, а в виде  $K_z(z) = c_1^{\alpha_1 z}$ , где  $c_1$  и  $\alpha_1$  — некоторые константы, которые являются соответствующими коэффициентами для иного начального профиля концентрации.

Исследуем теперь вопрос о разрешимости полученной выше системы уравнений. Сначала отметим, что коэффициенты исходного уравнения удовлетворяют следующим неравенствам:

$$0 \leq \omega(z) \leq \mu_1, \quad \nu \leq K_z(z) \leq m_1 \text{ и } \nu, m_1, \mu_1 > 0.$$

При этом  $0 \leq z \leq l$ .

Обозначим  $\max(m_1, \mu_1) = \mu$ . Ограниченность  $k_z(z)$  следует из заданного вида этой функции. Из определения  $\omega(z)$  видно, что  $\omega(z) > 0$  и  $\omega(z) \leq \max(\max_{0 < z < h} \omega(z), m(l)/\rho S(h)) = \mu_1$ .

Введем следующие обозначения:

$$c_z = \frac{c_{i+1} - c_i}{h}, \quad c_z^- = \frac{c_i - c_{i-1}}{h},$$

тогда исходное конечно-разностное уравнение примет вид

$$c_i^- - (K_z c_z)_i^- - \omega c_z = 0. \quad (8)$$

Пусть решение исходной задачи производится на промежутке времени  $[0, T]$  и  $T/\tau = n$  — число временных слоев. На области  $[0, T] \times [0, l]$  введем сумматорное тождество, соответствующее данному разностному уравнению, для этого домножим (8) на  $c_i^j$  и просуммируем по всем  $i$  и  $j$ . Далее верхний индекс опускается, таким образом получим

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_i^- c_i - (K_z c_z)_i^- - \omega c_z c_i) = 0. \quad (9)$$

Каждое слагаемое тождества (9) рассмотрим отдельно, но сначала домножим все слагаемые на  $h^2$ . Первое слагаемое можно преобразовать

$$h^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_i^* c_j = h^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( c_i^2 \frac{\tau}{2} \right) + \sum_{i=1}^m \left( c^2(T, ih) \frac{1}{2} - \frac{1}{2} c^2(0, ih) \right).$$

Второе слагаемое просуммируем по частям:

$$\begin{aligned} h^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_z c_z)_z^* c_i &= -h^2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m K_z c_z^2 + \\ + \sum_{j=1}^n [c(j\tau, l) K_z(l) c_z(j\tau, l) - c(j\tau, 0) K_z(0) c_z(j\tau, 0)] &= \\ = -h^2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} K_z c_z^2 - \sum_{j=1}^n Q c(j\tau, 0) \end{aligned}$$

и учтем граничные условия

$$c(j\tau, l) = 0, \quad -K_z(0) c_z(j\tau, 0) = Q.$$

Следовательно, (9) примет вид

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\tau}{2} h^2 c_i^2 + h^2 K_z c_z^2 - h^2 \omega c_z c \right) + \\ + \frac{h}{2} \sum_{i=0}^{m-1} [c^2(T, ih) - c^2(0, ih)] + \sum_{j=1}^n Q c(j\tau, 0). \end{aligned}$$

Все вычитаемые перенесем вправо и заменим на большую величину, а слагаемое  $\omega c_z c$  оценим по неравенству Коши с  $\varepsilon$ , тогда получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^n \frac{\tau h^2}{2} c_i^2 + h^2 K_z c_z^2 + \frac{h^2}{2} \sum_{i=0}^{m-1} c^2(T, ih) + \\ + Q \sum_{j=1}^n c(j\tau, 0) \leq \frac{h^2}{2} \sum_{i=0}^{m-1} c^2(0, ih) + \\ + h^2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^n \mu \left( \frac{\varepsilon}{2} c_z^2 + \frac{2}{\varepsilon} c^2 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Выберем  $\varepsilon$  таким образом, чтобы  $\frac{\mu\varepsilon}{2} = \nu$ , т. е.  $\varepsilon = \frac{2\nu}{\mu}$  в левой части отбросим все слагаемые, кроме первого, а в правой заменим член  $\sum_{i=0}^{m-1} c^2(0, ih)$  большим по величине  $\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{i=1}^n c^2$ , тогда тождество

(10) примет вид

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\tau}{2} c_i^2 \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{2} + \frac{\mu^2}{\nu} \right) c^2. \quad (11)$$

Из левой части все слагаемые можно было отбросить, так как они все положительны. Предположим, что на некотором временном слое все  $c_i^j = 0$ , тогда (3) примет вид

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\tau^{-1}}{2} c^2 \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{2} + \frac{2\mu^2}{\nu} \right) c^2.$$

Следовательно, чтобы на последующем слое по времени получить нулевое решение, необходимо

$$\tau \leq \frac{1}{1 + \frac{4\mu^2}{\nu}} < 1.$$

При таком ограничении величины шагов по времени мы будем иметь однозначную разрешимость исходной системы. Вопросы устойчивости для получаемого решения здесь рассматриваться не будут. Однако известно, что для задач такого рода необходимо, чтобы  $\tau = 0(h^2)$ , где  $\tau$  и  $h$  измерены в относительных единицах. Если задача решается в абсолютных единицах, необходим соответствующий пересчет.

Программа составлена на алголе, и счет реализован на ЭВМ М=222.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. М., Атомиздат, 1973. 183 с.
2. Филатов С. С. К расчету эффективности искусственного и естественного проветривания карьеров.— В кн.: Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах. Л., Гидрометеониздат, 1974, с. 108—113.
3. Козаков Л. А. Расчеты вертикального профиля концентрации загрязняющих веществ и оценка возможностей ее уменьшения путем перемешивания воздуха в карьерах.— «Тр. ГГО», 1973, вып. 310, с. 112—116.
4. Козаков Л. А. Учет влияния распределения примесей на эффективность искусственного проветривания карьеров.— «Тр. ГГО», 1972, вып. 294, с. 64—72.
5. Ладыженская О. А. Краевые задачи математической физики. М., «Наука», 1973.
6. Гавурин М. К. Лекции по методам вычислений. М., «Наука», 1971.

Н. З. Битколов, И. И. Иванов. Использование тепловой энергии горных пород для интенсификации естественного воздухообмена в карьерах	158
С. И. Зенов, Ф. А. Чеминава. Исследование процессов разрушения инверсий в карьере при различных схемах искусственного проветривания	169
С. С. Филатов, М. В. Блонский. К расчету искусственного проветривания застойных зон в карьерах вертикальными изотермическими струями	174
Я. З. Бухман, В. И. Белоусов, С. А. Табакова. Тепловое моделирование проветривания карьеров	182
М. М. Конорев, В. Н. Макаров, Г. Ф. Нестеренко, С. С. Филатов. К методике выбора рациональных схем искусственной вентиляции карьеров методом физического моделирования	192
Н. З. Битколов, И. И. Иванов. К вопросу искусственного проветривания карьеров охлажденным воздухом	200
С. С. Филатов. Основные итоги исследований в области создания средств искусственной вентиляции карьеров	207
В. В. Кондратенко. Расчет параметров потока в зоне факелов тепловой вентиляционной установки	213
И. Р. Поляков. Моделирование проветривания открытых горных выработок	221
М. В. Блонский. Электрическое моделирование спектра всасывания винта карьерного вентилятора, создающего вертикальную струю	226
В. П. Старущенко. Зависимость коэффициентов обмена при искусственном проветривании карьеров от их глубины и объема зоны загрязнения	231
Ю. В. Гуль, Л. Н. Полынцева. Отдельные вопросы охраны атмосферы в рабочих зонах карьера при отработке месторождений комбинированным способом	239
Я. З. Бухман, Б. М. Воробьев, Л. А. Козаков. О выборе способа и схем проветривания карьеров с учетом метеорологических условий	243
Л. А. Козаков, В. А. Марков. Численное решение уравнения диффузии для оценки изменения концентрации загрязняющих газов при естественном или искусственном проветривании карьеров	252

ТРУДЫ ГГО, вып. 359

**Микроклимат, воздухообмен  
и искусственное воздействие  
на атмосферу карьеров**

Редактор Г. И. Слабкович  
Техн. редактор Г. В. Ивкова  
Корректор И. А. Крайнева

Сдано в набор 30/1 1975 г. Подписано к печати 13/VI 1975 г. М-17235. Формат 60×90<sup>1/16</sup>, бумага тип № 1. Печ. л. 16,75 Уч.-изд. л. 17,04. Тираж 500 экз. Индекс МЛ-216. Заказ № 82. Цена 1 руб. 19 коп.

Гидрометеоздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР, Сортавала, Карельская, 42.

## СОДЕРЖАНИЕ

Н. З. Битколов, П. А. Воронцов, В. С. Никитин. Итоги и перспективные направления работ по управлению воздухообменом в карьерах	4
П. А. Воронцов, В. И. Селицкая, Е. В. Петрова. Термический режим и турбулентность в карьере Аксай	10
П. А. Воронцов, В. И. Селицкая, Е. В. Петрова. Аэрологические характеристики ветрового режима карьера Аксай	23
Л. Г. Бондарь. Результаты длительных метеорологических наблюдений в карьере Аксай	36
И. И. Иванов, Л. Г. Бондарь. О повторяемости инверсий температуры воздуха в карьере Аксай	48
П. В. Бересневич, Л. А. Раменский, А. В. Ткаченко, А. И. Фурман, О. И. Шандер, В. М. Шошин. Исследование микроклимата карьера Новокриворожского горно-обогатительного комбината	59
В. П. Куликов, Е. П. Харишин, В. Н. Щербак, А. Н. Куинн. Оценка состояния атмосферы угольного карьера им. 50-летия Октября на стадии его проектирования	68
В. С. Ивашкин, В. Н. Щербак, Е. П. Харишин. Анализ загрязнения атмосферы Коркинского карьера окисью углерода	80
И. И. Иванов. Влияние геотермического режима и температурной стратификации в приземном слое атмосферы на тепловой режим в карьере	85
М. С. Ахметов, В. Н. Щербак, Е. П. Харишин. Оценка влияния температурной стратификации на воздухообмен в карьерах	93
И. И. Иванов. Расчет конвективной теплоотдачи поверхностью карьера	98
Ю. В. Гуль. Об эффекте нестационарного воздухообмена в карьере под влиянием тепловой энергии работающих механизмов	106
С. И. Зенов. К вопросу оперативного прогноза накопления газов в атмосфере карьеров с помощью средств аналоговой вычислительной техники	109
З. И. Алексеева, Н. З. Битколов, И. И. Иванов. Опыт эксплуатации комплекса измерительных приборов вертикального зондирования атмосферы в карьерах	119
П. В. Бересневич, Г. Я. Николин, И. В. Фурса. Исследование схем естественного и искусственного проветривания карьеров Северного и Новокриворожского горно-обогатительных комбинатов	124
В. Н. Щербак, В. С. Ивашкин, А. Д. Лукин, В. А. Алексеев. К вопросу интенсификации естественного воздухообмена внешними отвалами	134
А. И. Павлов, М. В. Блонский. Оценка воздухообмена в карьерах Курской магнитной аномалии и Ковдорского горно-обогатительного комбината	142
Ю. В. Гуль. Оптимальные решения технологического характера по усилению естественной аэрации карьеров	150
В. А. Рогалев. Экспериментальная проверка усиления естественной аэрации карьеров путем формирования плавных аэродинамических профилей бортов	155