

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

06
+18

Т Р У Д Ы

ВЫПУСК 310

МИКРОКЛИМАТ КАРЬЕРОВ

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

269400

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 193193, Маломосковский пр., 98



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1973

В сборнике освещены основные направления научных исследований по улучшению атмосферных условий труда в карьерах, главным образом особенностей циркуляции воздуха. Приведены экспериментальные данные по термическому режиму, а также прогностические схемы для предупреждения условий, опасных для работы в карьерах.

Сборник предназначен для научных работников метеорологов, а также для специалистов по проектированию и добыче полезных ископаемых открытым способом.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник трудов по микроклимату карьеров является третьим: первый вышел в 1970 г., второй — в 1972 г. Проведенное в октябре 1971 г. при ГГО Всесоюзное совещание работников, занимающихся изучением микроклимата карьеров и их эксплуатацией, показало, что, помимо сравнительно небольшого числа учреждений Гидрометслужбы, вопросами изучения микроклимата карьеров занимается большое число специализированных организаций различных ведомств, учебных заведений и ряда министерств.

Вызвано это тем, что широкое развитие способа открытой разработки полезных ископаемых показывает все большее влияние на технологические процессы метеорологических условий. Это отражается на производительности труда, безопасности работ, здоровье горнорабочих и мн. др.

Открытая разработка месторождений предусматривает прежде всего искусственное изменение ландшафта и рельефа, что связано, с одной стороны, со значительным углублением поверхности, с другой, — со вскрытием значительных площадей.

Глубина современных карьеров достигает 200—300 м, проектируются до 500—700 м и более, глубина некоторых карьеров за рубежом свыше 700 м. Площади, занимаемые карьерами, исчисляются десятками квадратных километров.

Обнажение больших площадей в сочетании со значительным углублением земной поверхности ведет к созданию микроклимата, часто существенно отличного от местного климата окружающего района. Эти различия обусловлены рядом факторов, основными из которых являются: ослабление с глубиной поверхностного воздушного потока; большие различия в условиях притока солнечной энергии на различно ориентированные борта и уступы карьера на разных его уровнях, поглощения и отражения солнечной энергии ими; повышенная запыленность и загазованность воздуха в результате того или иного технологического процесса.

Неблагоприятные метеорологические условия, затрудняющие, а иногда и останавливающие работы в карьерах, многообразны (туманы, гололеды, снегопады, грозы и др.), но в основном это

процессы, приводящие к нарушению естественного воздухообмена. Поэтому все статьи данного сборника так или иначе связаны с вопросами естественного проветривания карьеров.

В данном сборнике приведены работы организаций, изучающих микроклимат карьеров: Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, Института биофизики Министерства здравоохранения СССР, Ленинградского гидрометеорологического института и Научно-исследовательского института открытых горных работ г. Челябинска.

Редактирование статей Института биофизики выполнено Н. З. Битколовым, а Ленинградского гидрометеорологического института — В. М. Шапаевым.

Н. З. БИТКОЛОВ, П. А. ВОРОНЦОВ

ЗАДАЧИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПРОВЕТРИВАНИИ КАРЬЕРОВ

При изучении вопросов проветривания карьеров установлено, что метеорологические параметры оказывают влияние на источники образования и распространения примесей, аэрацию и искусственное воздействие на атмосферу карьерного пространства.

Говоря о влиянии метеоусловий на источники образования примесей, следует прежде всего упомянуть о взаимодействии метеорологических параметров с горными породами и возможностях взвешивания аэрозолей последних в атмосфере. В этой связи весьма важными метеорологическими характеристиками являются скорость ветра, испаряемость, влажность и температурный режим горных пород и воздуха, количество осадков и т. п., знание которых позволяет не только прогнозировать вероятность тех или иных источников образования примесей, но и правильно выбрать методы их предупреждения. Так, для карьеров Средней Азии низкая влажность пород и большие потери влаги на испарение делают орошение малоэффективным. Аналогично в Восточной Сибири низкие температуры воздуха и продолжительный морозный период резко ограничивают применение воды для пылеподавления.

Аэрологический режим карьеров, а следовательно, и санитарно-гигиеническая характеристика воздуха в них являются функцией многих переменных, из которых первостепенное значение имеют скорость и направление ветра в районе предприятия и аэросиноптические условия.

Станции гидрометеорологической службы в ряде случаев значительно удалены от того или иного промышленного предприятия, и получаемые со станций метеорологические сведения могут существенно отличаться от обстановки в районе карьера. Поэтому по большинству горнопромышленных районов необходим набор соответствующей информации, пригодной к использованию как для действующих, так и для проектируемых карьеров.

Одной из существенных характеристик района карьера является рельеф местности, формирующий определенные скорости ветра на карьерной площадке. Влияние орографии на ослабление

ветровых потоков можно проиллюстрировать на примере следующих карьеров, в которых величина скорости ветра на их начало составляет $0,7U_{\Pi}$ в Хинганолово, $0,5 \div 0,6U_{\Pi}$ в Завитая, $0,85U_{\Pi}$ в Тулукуе. Весьма неблагоприятны в этом плане и карьеры, частично расположенные на косогорах (Лениногорский, Кургашино-канский, Зыряновский и др.). На некоторых карьерах (Акса́й, Красный Камень) за счет расположения их на возвышенностях рельефа, наоборот, наблюдается увеличение скорости воздушных потоков.

Скорость ветра на площадке будущего карьера в общем случае можно найти по формуле

$$U_{\text{пк}} = (1 - p_1) U_{\Pi}, \quad (1)$$

где U_{Π} — скорость ветра, характерная для рассматриваемого района, м/сек.; p_1 — коэффициент, учитывающий ослабление ветра.

На степень ослабления ветра влияет закрытость горизонта:

Закрытость горизонта,					
град.	0	5	10	15	>15
H'/L_1	0	0,09	0,18	0,27	0,30
p_1	0	0,1	0,2	0,3	рециркуляция

Здесь H' — превышение рельефа над начальной отметкой по данному азимуту, м; L_1 — расстояние до возвышения.

Энергия ветрового потока, являясь одним из основных показателей естественного проветривания карьерного пространства, крайне неравномерна во времени. Поэтому для суждения об интенсивности воздухообмена недостаточно знать только значения средней годовой скорости. Согласно цикличности работы карьера важнейшей характеристикой ветра является его суточный и годовой ход. Суточный ход скорости ветра позволяет определить наиболее вероятные часы ее уменьшения и полного безветрия, т. е. часы возможного накопления примесей, и соответственно организовать работу в карьере. Изменение скорости ветра в течение года позволяет выявить безветренные периоды, определить их продолжительность и повторяемость и тем самым оценить потребность в искусственном воздействии и экономические показатели для него. Исходя из этого целесообразно районировать промышленные предприятия по величине и равномерности изменения скорости ветра.

В процессе разработки карьера орография района его расположения в определенной степени изменяется отвалами и, кроме того, происходит дальнейшая трансформация ветровых потоков как за счет увеличения глубины, так и в результате формирования микроклимата карьерного пространства.

Рост глубины карьера влечет за собой увеличение его общей поверхности при том же размере в плане, и, как следствие этого, средний приток тепла к единице поверхности сокращается.

Приращение площади карьера

$$\eta = \frac{S_{\Pi} + S_{\Gamma}}{S_{\Pi}} = 1 + ap + bp^2, \quad (2)$$

где $p = H/L$ — безразмерный параметр, S_{Π} — площадь наклонных поверхностей; S_{Γ} — площадь горизонтальных поверхностей; $S_{\Pi\Gamma}$ — площадь карьера в плане.

Величины коэффициентов a , b и k можно найти по следующим формулам:

$$a = k \left[1 + \frac{H_1}{L_{\Pi}} (\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha) \right], \quad (3)$$

$$b = -k \operatorname{ctg} \beta, \quad (4)$$

$$k = 4 \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}. \quad (5)$$

Здесь α и β — средние значения углов откоса уступа и борта соответственно; H_1 — высота уступа.

Наряду с сокращением среднего притока тепла к единице поверхности, его величина уменьшается и в результате увеличения закрытости горизонта для точек, расположенных в карьере. По любому азимуту закрытость горизонта найдется как

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{H}{H \operatorname{ctg} \beta + L}, \quad (6)$$

где L — расстояние от рассматриваемой точки до борта по соответствующему азимуту. В связи с более поздним восходом солнца для точек в карьере естественно снижается продолжительность освещения солнцем. Разница в продолжительности освещения солнцем верхних и нижних уступов составляет в летние месяцы 4—6 час., зимой из-за низкого положения солнца солнечные лучи в ряде случаев вообще не попадают в нижнюю часть карьера.

Кроме изменения притока тепла по глубине, его распределение крайне неравномерно по различным бортам вследствие их разной ориентации по сторонам света.

Наибольший приток тепла на Ботабурумском карьере во все периоды года наблюдается к северному борту, наименьший — к южному. Сумма радиации в ноябре составляет для северного 130 кал/см^2 в сутки, для южного 15 кал/см^2 в сутки; в августе соответственно 400 и 100 кал/см^2 в сутки. Таким образом, сумма радиации, приходящей на южный борт, летом в 4, а зимой в 7—8 раз меньше, чем на северный. Приток тепла к западному и восточному бортам в среднем одинаков, но разница между сроками максимумов радиации для этих бортов составляет 5 час. Так, в 9 час. на западном борту напряжение радиации на $0,85 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин.}$ выше, чем на восточном. Такого же порядка различия наблюдаются и в 16—17 час. при соответствующих более высоких значениях радиации на восточном борту.

Приведенные закономерности показывают изменение притока тепла к поверхностям в карьере; они получены для определенной группы и определенного месторасположения карьеров. Важность

условий распределения тепла и его значимость в формировании термодинамического режима, с одной стороны, многообразие карьеров по форме, глубине и географическому положению — с другой, определяют целесообразность постановки специальных исследований теплового режима на ряде карьеров Советского Союза.

Знать радиационный режим разных карьеров необходимо как с позиций их естественного воздухообмена, так и в плане регулирования тепловых условий на рабочих местах.

Распределение тепловой энергии по карьере обуславливается распределением температур горных пород; разница между температурами достигает $15-20^{\circ}\text{C}$ для различно ориентированных бортов и $8-10^{\circ}\text{C}$ в пределах одного борта. В результате этого неизбежно возникают местные потоки воздуха определенной скорости и направления, которые накладываются на действующие в карьере поверхностные воздушные потоки. Следствием этого является результирующая скорость и роза ветров в карьерах. Наглядное представление о роли местных потоков, сформированных температурными неоднородностями, дает динамика суточного хода относительной скорости ветра в разные периоды года. Если в зимние месяцы величина относительной скорости ветра $\Delta U = 0,3 \div 0,4$ с амплитудой 0,1, то весной $\Delta U = 0,2 \div 0,5$ с амплитудой 0,2—0,25, а летом $\Delta U = 0,6$ с амплитудой 0,3—0,35.

Естественно, что с увеличением скорости поверхностного ветра температурное поле выравнивается и роль местных потоков в формировании результирующей скорости ветра в карьере ослабевает. Представление об этом дает характер изменения скорости ветра в карьере в зависимости от ее величины на поверхности.

Так, при небольших скоростях ветра на поверхности скорости ветра в карьере и вне его в ряде случаев сопоставимы по величине. В то же время при $U_{\text{п}} > 4 \div 5$ м/сек. относительная скорость ветра в карьере существенно меньше, сглаживается по амплитуде, что позволяет косвенно судить о величинах местных потоков, создаваемых температурными неоднородностями, они составляют 2—2,5 м/сек.

Существенная роль местных потоков в формировании термодинамического режима в карьерах подтверждается розой ветров в карьерах. Систематизация данных о направлении ветра отчетливо показывает тенденцию к развитию в карьерах преимущественно ветров южного направления к наиболее нагретому северному борту. При этом в зимние месяцы картина существенно нивелируется.

Таким образом, необходима постановка исследований радиационного и температурного режимов карьеров в комплексе с наблюдениями за скоростью и направлением ветра в карьерах, что позволяет оценить интенсивность и условия естественного проветривания и произвести их учет при выборе способов искусственного воздействия.

Неоднородный температурный режим карьеров получает свое выражение не только в различных температурах его участков, но

и в разных соотношениях между температурами почвы и воздуха, формируя определенные направления теплового потока. Весьма наглядной характеристикой этого является разница между температурами почвы и воздуха. Градиент температуры почва — воздух для северного борта практически всегда сохраняется положительным, согласуясь с максимальным притоком тепла к указанному борту. В целом повторяемость отрицательных градиентов в карьере значительно выше, чем за его пределами, т. е. турбулентный поток тепла в карьере по сравнению с поверхностью чаще направлен от воздуха к почве. Конечным результатом такого процесса будет скопление холодных масс воздуха в нижней части карьера с соответствующим снижением воздухообмена.

Наибольшая повторяемость отрицательной разности температур отмечается на южном борту, что позволяет считать его наиболее вероятным участком зарождения внутрикарьерных инверсий. Вероятность развития инверсий в карьерах связана не только с микроклиматом карьера, но и с синоптическими условиями.

Анализ синоптических условий, при которых зарегистрированы случаи нарушения воздухообмена, показывает, что эти нарушения наблюдаются преимущественно при антициклонах. Вместе с тем были отмечены случаи накопления примесей в атмосфере карьеров и при других синоптических условиях.

Так, по Кургашиноканскому карьере 35% случаев нарушения воздухообмена наблюдалось при циклонической погоде. Это можно объяснить климатическими условиями Средней Азии, где циклоны зимой несут теплые массы воздуха. Анализ карт погоды над Блявинским карьером показывает, что антициклоническая погода не всегда ведет к нарушению воздухообмена. Необходимо оценить структуру антициклона, мощность его слоев и их взаимодействие между собой и атмосферой карьерного пространства. Большинство нарушений отмечено на северо-западной периферии и в центральной части стационарного антициклона.

Безусловно, природа нарушений воздухообмена в карьерах может быть различна, но они всегда связаны с устойчивой стратификацией, способствующей накоплению примесей в атмосфере карьеров. Накопленный опыт показывает, что целесообразно организовать специальные аэрологические наблюдения и провести анализ синоптического материала по различным горнопромышленным районам страны для своевременного снабжения их оперативной информацией и разработать надежные методы прогноза опасных метеорологических явлений.

Таким образом, основными задачами, связанными с проветриванием карьеров, на современном этапе являются:

- 1) постановка комплексных климатических исследований в карьерах для основных горнопромышленных районов страны;
- 2) уточнение теории процессов естественного воздухообмена для карьеров разной геометрии и географического положения;
- 3) разработка и совершенствование методов прогноза нарушений воздухообмена;

4) создание теоретических основ искусственного воздействия на атмосферу карьеров и разработку соответствующих средств активизации воздухообмена.

Первостепенное значение метеорологических условий в вопросах аэрации карьеров, распространения и накопления примесей в них и неразрывная связь всех этих факторов определяют необходимость более широкого привлечения специалистов Гидрометслужбы к решению стоящих задач.

*П. А. ВОРОНЦОВ, В. С. ИВАШКИН,
В. П. КУЛИКОВ, В. Н. ЩЕРБАК*

РЕЖИМ ВЕТРА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ И ИХ УЧЕТ ПРИ ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

В статье сделан итоговый обзор основных результатов по изучению ветрового режима и турбулентности Коркинского карьера на основании частично опубликованных материалов за период 1968—1970 гг. Эти исследования позволили выявить ряд особенностей, характерных для данного района. Так, розы ветров для месяцев теплого периода года показывают, что на прилегающей к карьере территории сохраняется ветровой режим, типичный для Южного Урала. В апреле начинается переход к летним процессам — наряду с южными и юго-западными ветрами появляются ветры с северо-западной составляющей, а с мая по август преобладают северные и северо-западные ветры.

В сентябре отмечается переход к зимним процессам — увеличение повторяемости ветров южных и юго-западных направлений.

Совершенно иная картина распределения воздушных потоков на дне карьера. В теплое полугодие ветры любого направления равновероятны — роза ветров имеет почти круговую форму независимо от направления ветра на поверхности. Квазикруговая роза ветров позволяет предположить о наличии периодичности направления, связанной с развитием местных циркуляций ветра в разное время суток. Имеющиеся данные дают возможность установить следующее: ночью преобладают ветры южной половины горизонта, утром наблюдается поворот ветра к восточной половине горизонта, а вечером — к западной.

В холодное полугодие на дне разреза (карьера) преобладают северо-восточные, восточные и юго-западные потоки, причем также отмечается некоторая периодичность направлений ветра на дне — днем преобладают юго-восточные ветры, ночью — северо-западные. Ветровой поток в карьере в большинстве случаев в течение суток изменяется на $90\text{--}135^\circ$. Наибольшее отклонение претерпевают ветры юго-западного и северо-западного направлений, а наименьшее — северо-восточного, северного и западного.

Изменение скорости воздушных потоков на дне зависит от изменения не только скорости ветра на поверхности, но и его направления. Так, при северных и северо-восточных ветрах на поверхности значение $k = \bar{u}_H / u_{\pi}$ в среднем больше, чем при других направлениях. Это обусловлено большей термодинамической неустойчивостью воздуха при ветрах указанных направлений — при повышенной турбулентности возрастает выравнивание скоростей по высоте внутри карьера.

Изменение скорости потоков с глубиной может быть описано следующей приближенной формулой:

$$U_H = U_{\pi} 0,6^H,$$

где U_H — скорость потоков на уровне H ; U_{π} — скорость ветра на поверхности; H — глубина в сотнях метров.

Из этой формулы видно, что, например, на глубине около 300 м скорость составляет 20—30% скорости ветра на поверхности. Она дает достаточно хорошие результаты при расчете средних месячных скоростей ветра.

Из метеорологических параметров вне карьера, которые влияют на видимость¹ внутри карьера, в первую очередь следует назвать направление и скорость ветра, стратификацию атмосферы, степень покрытия неба облаками. Функциональной связи условий загрязненности с температурой и влажностью воздуха пока не удалось установить. Можно лишь сказать, что чем больше повторяемость определенных величин температуры и влажности, тем больше вероятность загрязнения атмосферы в карьере при этих значениях метеозлементов. Так, в зимний период на поверхности наибольшую повторяемость имеет температура от 0 до -15°C и соответственно при этом диапазоне температуры чаще всего отмечено загрязнение внутри карьерной атмосферы [1].

О связи загрязненности атмосферы разреза с направлением и скоростью ветра позволяет судить табл. 1, которая составлена с учетом ветрового потока в момент образования загрязненности.

Из табл. 1 видно, что наиболее часто (примерно 80%) ухудшение видимости в разрезе происходит при ветрах южного и юго-западного направлений и скорости менее 5 м/сек., причем умеренное и сильное загрязнение происходит почти всегда при южных и юго-западных ветрах.

Аналогичное распределение повторяемости имеет инверсия при различных направлениях и скоростях ветра. Так, повторяемость инверсий при различных направлениях ветра на прилегающей к карьере территории следующая:

Направление	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль	Всего
Повторяемость, % .	5	1	2	1	32	30	13	9	7	100%

¹ Визуально наблюдаемая загрязненность.

Таблица 1

Повторяемость (%) ухудшения видимости при различных направлениях ветра

Скорость ветра, м/сек.	Видимость, м	Направление ветра								
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
0—2	<500					1,2	6,0			1,2
	500—1000					3,6	2,4		2,4	8,4
	1000—2000	2,4		1,2		7,2	3,6	6,0		20,4
3—5	<500					2,4	4,8		1,2	8,4
	500—1000					3,6	4,8			8,4
	1000—2000	1,2				15,8	13,4	3,6		34,0
Более 5	<500									0
	500—1000	1,2								1,2
	1000—2000					6,0	4,8			10,8
	Всего	4,8	0	1,2		39,8	39,8	9,6	3,6	100

Повторяемость инверсий при различных скоростях ветра на прилегающей к карьере территории будет:

Скорость ветра на поверхности, м/сек. . .	штиль	1—2	3—5	более 5	всего
Число случаев	63	285	802	279	1429
Число инверсий	10	44	117	21	192
Повторяемость, %	16	15	15	8	13

При малых скоростях ветра на поверхности наиболее часто происходит образование инверсионных слоев, а при скорости более 5 м/сек. в связи с усилением турбулентного обмена инверсии редки.

Повторяемость загрязненности при различном состоянии неба представлена в табл. 2.

Таблица 2

Повторяемость (%) загрязненности при различном состоянии неба

Видимость, м	Облачность, баллы			Всего
	0—2	3—7	8—10	
Менее 500	13,8	3,7	0	17,5
500—1000	10,0	3,7	2,5	16,2
1000—2000	25,0	18,8	22,5	66,3
Всего	48,8	26,2	25,0	100

Загрязнение внутрикарьерной атмосферы почти в 50% случаев происходит при малооблачной погоде, при этом сильное и умеренное загрязнение происходит чаще всего именно при ясной погоде. Вероятность загрязнения при пасмурной погоде (8—10 баллов) составляет 25%, причем при такой облачности наблюдается чаще всего слабое загрязнение. Следует также отметить, что при пас-

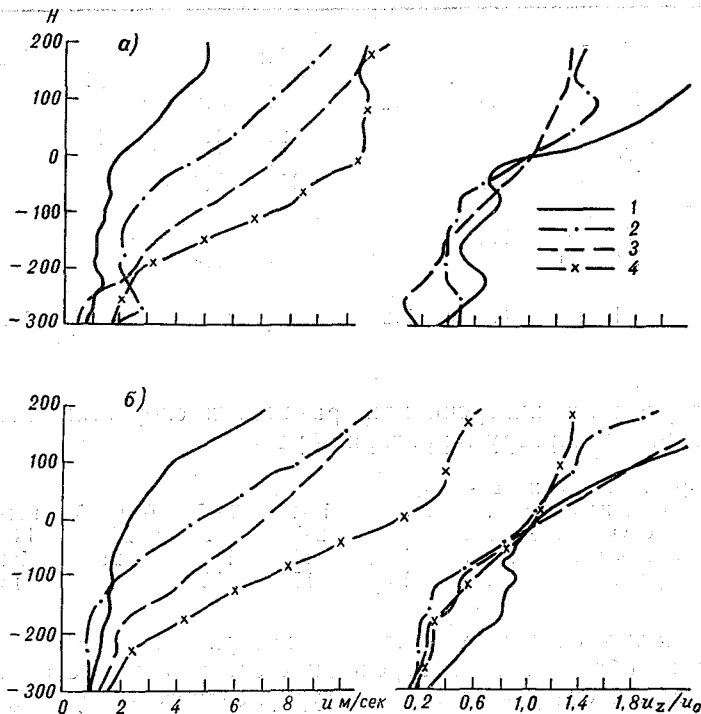


Рис. 1. Профили u_z и u_z/u_0 в карьере в холодный период года при различных скоростях ветра на прилегающей к карьере территории.

a — западное направление, b — южное направление; 1 — 0—3,0 м/сек., 2 — 3,1—6,0 м/сек., 3 — 6,1—9,0 м/сек., 4 — более 9 м/сек.

мурной погоде продолжительность пониженной видимости кратковременная. С другой стороны, при пасмурной погоде ухудшение видимости в карьере в некоторых случаях связано с выпадением осадков и оседанием тумана.

Аэрологические наблюдения в карьере позволили построить вертикальные профили скорости ветра (рис. 1 и 2). При разбивке на группы за исходные брались направления и скорости ветра на бровке карьера.

При южных и западных ветрах, преобладающих в холодный период года, происходит быстрое уменьшение скорости потоков

с глубиной, особенно в верхнем 200-метровом слое. По мере приближения ко дну уменьшение замедляется, а иногда даже наблюдается некоторое усиление скорости, вызываемое, по-видимому, термическими факторами.

Северные и восточные ветры, преобладающие в теплый период, характеризуются меньшими скоростями и не превышают 6 м/сек.

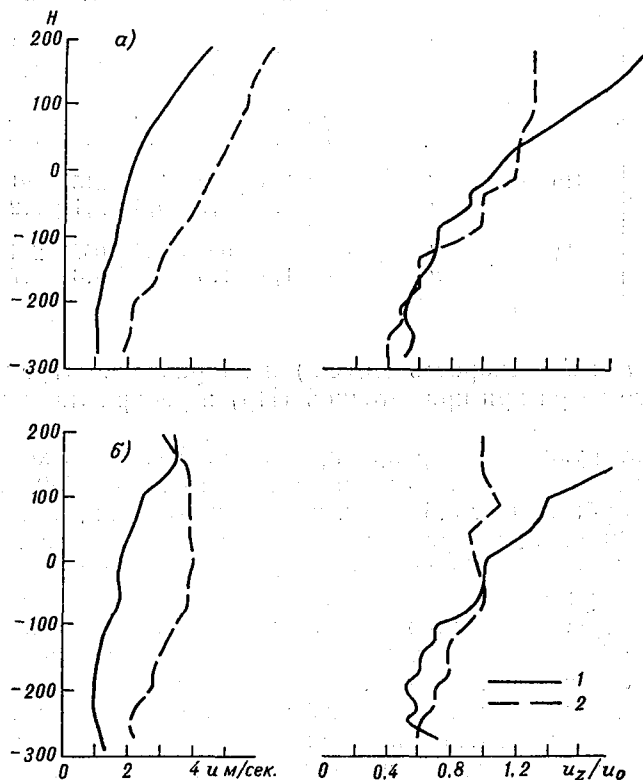


Рис. 2. Профили u_z и u_z/u_0 в карьере в теплый период года при различных скоростях ветра на прилегающей к карьере территории.

a — северное направление, b — восточное; 1 — 0 — 3,0 м/сек., 2 — 3,1 — 6,0 м/сек.

на бровке. В этих случаях благодаря большей турбулентности уменьшение скорости с глубиной происходит медленнее.

Для характеристики интенсивности воздухообмена и направления выноса из карьера воздуха, содержащего примеси, найдены значения результирующего¹ ветра на различных высотах (табл. 3).

¹ Под результирующим ветром понимается средний вектор ветра в данном месте, на данном уровне за определенный период.

Результирующий ветер в карьере

Период	Схема	Направление, скорость	Высота, м							
			—300	—275	—250	—200	—150	—100	—50	0
Теплый	Пр	<i>d</i>	037	070	050	043	045	041	034	023
		<i>и</i>	0,6	1,3	1,1	1,2	1,3	1,6	1,8	1,6
Теплый	Рц	<i>d</i>	030	139	090	083	337	306	002	310
		<i>и</i>	0,1	0,3	0,3	0,7	0,6	1,0	1,05	1,1
Холодный	Пр	<i>d</i>	—	158	202	177	215	221	221	224
		<i>и</i>	—	0,7	0,7	0,6	2,1	2,2	3,3	3,6
Холодный	Рц	<i>d</i>	—	098	097	087	057	204	193	180
		<i>и</i>	—	1,8	1,3	0,6	0,3	0,7	2,0	1,2

Здесь *и* и *d* — скорость (м/сек.) и направление (град.) результирующего ветра при прямоточной (Пр) и рециркуляционной (Рц) схемах.

Результирующий ветер при прямоточной схеме в холодный период почти не меняется по направлению в слое 0—250 м, скорость же быстро убывает от 3,6 м/сек. на уровне бровки до 0,6 м/сек. на глубине 200 м, ниже практически остается постоянной. В теплый период наблюдается большое постоянство как направления, так и скорости результирующего ветра.

Результирующий ветер при рециркуляционной схеме имеет другие особенности распределения по высоте. Скорость его, за редким исключением, меньше, чем при прямоточной схеме. Кроме того, отмечается резкая смена его направления на обратное. В холодный период смена направления происходит на глубине 100—150 м с минимальной скоростью на этом уровне, в теплый период — на глубине 150—200 м с минимумом скорости на более низких уровнях. При рассмотрении естественного проветривания карьеров важной является оценка влияния турбулентности атмосферы на воздухообмен.

По данным аэростатного зондирования в карьере и синхронных наблюдений за температурой воздуха на его бортах установлено, что здесь часто отмечаются большие величины горизонтального градиента температуры dt/dx , превосходящие иногда на порядок и больше значения горизонтальных градиентов в пограничном слое атмосферы. Это приводит к развитию термической микроциркуляции, меняющейся в течение суток по интенсивности и направлению.

Большую роль в деформации основного потока играют турбулентность и термическая неустойчивость. Большие вертикальные градиенты скорости в верхней половине карьерного пространства

могут привести даже при инверсиях к повышенной термодинамической неустойчивости с зонами вихрей.

При значительной скорости ветра на поверхности ($u \geq 6$ м/сек.) воздушный поток может иногда отражаться от наветренного борта, образуя обратную циркуляцию. При малых скоростях ветра может возникать несколько зон с неустойчивым направлением ветра. Тогда роль термических факторов в проветривании заметно повышается.

Большое значение для вентиляции карьера имеют зоны сдвига ветра, характеризующие переход энергии основного движения в энергию турбулентности [2]. Зависимость между коэффициентом турбулентности k и величиной сдвига ветра du/dz можно выразить через касательное напряжение τ :

$$\tau = k_1 \frac{du_1}{dz} = k_2 \frac{du_2}{dz} = \text{const.} \quad (1)$$

Следовательно, по значениям сдвига ветра за равные периоды можно определить относительные различия в значениях k .

В табл. 4 приведены значения du/dz для холодного и теплого периодов при $dz=50$ м. Данные разбиты на группы в зависимости от скорости ветра на уровне бровки.

Таблица 4

Сдвиг ветра в карьере

Период	Скорость на бровке, м/сек.	Слой, м								
		0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300	300—350	350—400	400—450
Холодный	$u < 3$	0,3	0,1	0,2	-0,2	0,1	0,3	1,4	0,7	1,5
	$3 \leq u < 6$	0,7	-1,2	0,1	0,6	1,1	1,5	1,6	1,3	1,5
	$6 \leq u < 9$	-0,3	1,2	0,9	1,3	1,4	1,6	0,8	1,1	1,0
	$u \geq 9$	0,4	0,9	1,9	2,3	1,5	1,3	0,9	0,2	-0,1
Теплый	$u < 3$	0,0	0,4	-0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,2
	$3 \leq u < 6$	0,7	0,1	0,2	0,5	0,7	0,6	0,4	0,5	0,3

С увеличением скорости ветра на бровке значения сдвига ветра внутри карьера возрастают. Максимальные значения du/dz в оба сезона наблюдаются в его верхней части, а по величине больше зимой. Чем больше du/dz , тем меньше величина k (формула (1)). Из этого следует, что наибольшая турбулентность в этом слое отмечается в теплое время года.

Величина du/dz входит в критерий Ричардсона, определяющий вероятность развития турбулентности. Из уравнения Ричардсона вытекает, что кинетическая энергия частицы, пришедшей в слой, может вызвать перемещение другой частицы по вертикали на некоторую высоту в том случае, если энергия первой частицы будет

больше требующейся для этого работы. Это записывается уравнением в виде

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 > \frac{g}{T}(\gamma_a - \gamma). \quad (2)$$

При положительном значении $\gamma_a - \gamma$ может происходить критическое возрастание скорости ветра, при котором

$$\frac{T}{g} \left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \gamma > \gamma_a, \quad (3)$$

где γ_a и γ — адиабатический и фактический температурные градиенты ($^{\circ}\text{C}/100$ м).

Слагаемое $\frac{T}{g} \left(\frac{du}{dz}\right)^2 = \gamma_d$ называют ветровым эквивалентом вертикального градиента температуры. Если $\gamma_d + \gamma > \gamma_a$, то кинетическая энергия перемешивания возрастает, турбулентность усиливается и состояние воздуха становится неустойчивым, хотя $\gamma < \gamma_a$. Если $\gamma_d = 0$, тогда термическая устойчивость принимает обычную форму. Следовательно, условия для развития турбулентного перемешивания можно выразить формулой

$$\Gamma = (\gamma_d + \gamma) > \gamma_a. \quad (4)$$

В табл. 5 приведен расчет γ_d по данным сдвига ветра.

Таблица 5.

Средние значения γ_d по слоям

Период	Скорость на бровке, м/сек.	Слой, м							
		0—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300	300—350	350—400
Холодный	$u < 3$	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	2,05	0,53
	$3 \leq u < 6$	0,53	1,56	0,00	0,39	1,20	2,42	2,76	1,82
	$6 \leq u < 9$	0,10	1,56	0,88	0,83	2,05	2,76	0,69	1,20
	$u \geq 9$	0,17	0,88	3,82	5,76	2,42	1,83	0,88	0,00
Теплый	$u < 3$	0,00	0,19	0,04	0,04	0,04	0,04	0,18	0,42
	$3 \leq u < 6$	0,74	0,00	0,04	0,29	0,57	0,42	0,18	0,29

Как следует из таблицы, величина γ_d при малых скоростях ветра невелика и её вклад в развитие турбулентности мал как в теплый, так и в холодный период года. При умеренных ветрах (3—6 м/сек.) на уровне бровки величина γ_d в верхней части карьера в теплый период составляет 0,3—0,6 $^{\circ}\text{C}/100$ м. Отсюда следует, что даже при $\gamma = 0,4 \div 0,7^{\circ}\text{C}/100$ м может наблюдаться неустойчивая стратификация внутри карьерной атмосферы. Значительные γ_d в холодный период указывают на то, что сильная термическая неустойчивость атмосферы в карьере может отмечаться и зимой.

При ветрах более 6 м/сек. γ_d , как правило, значительно больше γ , т. е. в этих условиях должна быть весьма интенсивная турбулентность с неустойчивым состоянием атмосферы. В отдельных случаях du/dz достигает 8—10 м/сек. на 50 м, что соответствует развитию настолько интенсивной турбулентности и неустойчивости, что значение термической стратификации практически сводится к нулю.

По данным нескольких синхронных наблюдений в карьере в слое от —100 до —50 м, в западной части было получено $du/dz \sim 10$ м/сек., в то время как в восточной части $du/dz = 2,5$ м/сек., что соответствовало γ_d 29° С/100 м в западной и 6,7° С/100 м в восточной части, т. е. интенсивность турбулентности в этом слое в западной части была в 4—4,5 раза больше, чем в восточной.

При слабых скоростях ветра величины du/dz малы и больших различий в значениях γ_d нет. Можно ожидать, что в этих условиях основное влияние на интенсивность воздухообмена будет оказывать термическая стратификация атмосферы.

В атмосфере карьера могут возникать мезомасштабные струи, под которыми следует понимать слои воздуха в карьере и над ним с наибольшей составляющей скорости горизонтально движущегося потока по отношению к ниже- и вышележащим слоям. Подобные струи очень часто наблюдаются в пограничном слое атмосферы (в слое до нескольких сот метров над уровнем земной поверхности), они оказывают большое влияние на работу авиации, на высотные сооружения, распространение вредных примесей и прогноз их накопления. Очевидна их роль и в проветривании карьеров.

Пример строения такой струи по данным наблюдений в августе и декабре 1968 года представлен в табл. 6.

Таблица 6

Характеристика мезомасштабной струи

Параметр	Август					Декабрь		
	7—9	9—11	11—15	15—17	17—19	9—11	11—13	13—15
Струя								
u	7,1	5,6	5,0	5,4	7,6	12,0	10,1	10,9
Δ	—2,9	—1,6	—1,3	—2,0	—1,6	—1,0	—2,5	—1,7
L	75	85	90	75	150	150	50	100
Повторяемость, %	24	26	33	65	24	18	17	10
Все наблюдения								
$\overline{u}_d$	3,1	3,2	4,0	4,8	4,9	6,7	5,5	5,7
Δ_d	1,1	0,6	0,9	0,4	0,6	2,3	2,2	1,9

В таблице u — скорость ветра по оси струи (м/сек.), Δ — градиент скорости ветра (струи) (м/сек.), L — толщина слоя, в котором отмечается уменьшение скорости ветра (м), $\bar{u}_\delta$ — средняя скорость ветра на уровне бровки; Δ_δ — градиент скорости ветра на уровне бровки.

Более часто и интенсивно мезомасштабная струя в Коркинском карьере развивается в летнее время в дневные часы. В полуденные часы августа вероятность развития струи составляет 60—65%, а в зимнее время 10—18%.

Вследствие механического влияния формы карьера турбулентность ниже оси струи выражена особенно отчетливо. Хорошо заметны уменьшение турбулентности на оси струи и максимум скорости ветра.

Судя по хорошо выраженному суточному ходу развития струи с максимумом в полуденные часы и уменьшением вероятности ее развития в зимнее время, струя над карьером должна иметь термическое происхождение.

По результатам шаропилотных наблюдений изучено распределение вертикальной составляющей скорости ветра w в карьерном пространстве. Установлено, что величина w имеет хорошо выраженный суточный и годовой ход с максимумом на всех уровнях в полуденные часы и летнее время. Характерной особенностью распределения величины w в карьере является резкое ее возрастание во все сроки и периоды года до уровня примерно в 230—240 м ото дна. Вблизи бровки отмечается некоторое уменьшение w , а выше — снова рост w .

В зимний период среднее значение w почти в 2—3 раза меньше, чем в летний. Наряду с восходящими движениями в этот период более отчетливо выражены нисходящие движения воздуха.

Судя по распределению w , в дневные часы летнего времени воздухообмен, а следовательно, и вынос продуктов загрязнения в Коркинском карьере происходит на его наветренной стороне в 2—3 раза интенсивнее, чем зимой.

Влияние скорости ветра на бровке карьера $u_{\text{п}}$ на величину вертикальной составляющей w видно из данных табл. 7, а именно w

Таблица 7

Средние значения w при различной скорости ветра на бровке

$u_{\text{п}}$ м/сек.	Слой, м											
	0—100			100—200			200—300			Выше 300		
	IV	VIII	XII	IV	VIII	XII	IV	VIII	XII	IV	VIII	XII
0—3	39	46	10	67	88	21	98	95	38	67	108	35
3—5	39	54	21	55	129	43	69	139	51	114	149	68
5—7	65	—	33	99	—	51	63	—	60	176	—	77
Более 7	60	—	34	48	—	45	—	—	55	—	—	84

растет с увеличением скорости ветра $u_{ш}$. Это говорит о том, что в большинстве случаев важную роль в воздухообмене играет энергия ветрового потока, который проходит над карьером, высасывая из него воздух, содержащий различные загрязнения, заменяя его более чистым воздухом основного потока.

Определенное влияние на интенсивность проветривания оказывает энергия турбулентных пульсаций скорости ветра, которая определяется как

$$E = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2), \quad (5)$$

где σ_u , σ_v , σ_w — средние квадратические значения продольной, поперечной и вертикальной составляющих пульсаций скорости ветра.

Считая в первом приближении распределение турбулентных пульсаций в карьерной атмосфере изотропным, можно принять, что

$$E = 1,5 \sigma_w^2. \quad (6)$$

Энергия основного (ветрового) потока для единицы массы рассчитывалась по формуле

$$B = \frac{1}{2} \bar{u}^2, \quad (7)$$

где $\bar{u}$ — средняя в слое скорость ветра.

Распределение E повторяет особенности хода вертикальной составляющей скорости ветра w . Характерной особенностью энергии основного потока B является ее рост от дна карьера до уровня 100 м выше бровки, причем, в отличие от E , абсолютные величины B в теплый и холодный периоды года не имеют резких различий; интересным представляется распределение параметра E/B (табл. 8). Большой удельный вес энергии турбулентных пульсаций по отношению к энергии основного потока приобретает в летнее время. Например, в полуденные часы на верхних уровнях величина отношения E/B близка к единице, т. е. роль в проветривании обоих видов энергии одинакова [3].

В зимнее время величина E/B значительно меньше единицы на верхних уровнях и примерно равна величине отношения за летний период на нижних уровнях.

Полученные в натурных условиях Коркинского карьера новые данные позволяют скорректировать и уточнить известный метод расчета естественной вентиляции карьеров. Расчет проветривания карьерного пространства за счет энергии ветра базируется на следующем основном уравнении пограничного слоя плоско-параллельной струи несжимаемой жидкости:

$$F''' + F = 0, \quad (8)$$

где $F(\varphi)$ — функция, пропорциональная функции тока $\psi = \int u dy$, а независимая переменная $\varphi = y/dx$.

Дневной ход величин E , B и E/B в карьере в различные
сроки наблюдений

Середина слоя от дна, м	Август					Декабрь, февраль, март		
	8	10	13	16	18	10	12	15
$E = 1,5 (\sigma_w)^2 \text{ м}^2/\text{сек.}^2$								
50	0,2	0,4	0,9	0,5	1,5	0,3	0,5	0,6
150	0,5	0,7	2,1	2,3	3,8	0,3	1,2	1,0
250	0,6	1,9	6,6	7,6	6,0	0,7	1,2	1,6
350	0,5	2,0	6,8	5,6	3,9	—	1,1	—
$B = 0,5 (\bar{u})^2 \text{ м}^2/\text{сек.}^2$								
50	0,3	0,7	2,2	3,6	2,8	1,3	1,12	0,8
150	0,8	1,0	2,9	6,2	6,4	4,2	2,4	2,8
250	3,1	3,4	5,7	10,8	8,1	15,0	8,8	6,8
350	6,6	5,3	8,9	12,5	12,8	—	19,2	—
E/B								
50	0,66	0,57	0,40	0,14	0,53	0,20	0,40	0,70
150	0,62	0,70	0,72	0,37	0,59	0,12	0,53	0,35
250	0,20	0,56	1,16	0,70	0,74	0,04	0,13	0,24
350	0,08	0,38	0,76	0,45	0,31	—	0,06	—

Это уравнение получено в предположении, что масштаб турбулентности не изменяется в поперечном направлении $l(y) = \text{const}$, а в продольном направлении пропорционален расстоянию от полюса струи, т. е.

$$l(x, y) = cx. \quad (9)$$

Выражение (8) является линейным дифференциальным уравнением с постоянным коэффициентом и для него можно написать общее решение, с которым сравним натурные профили скорости ветра, наблюдаемые в разрезе [4, 5].

На рис. 3 приведена аналитически рассчитанная связь между u/u_0 и $\Phi(x, y)$ — координаты точки, в которой определяется продольная составляющая скорости (кривая 1), и эта же зависимость по материалам базисных шаропилотных наблюдений, проведенных в светлое время суток в Коркинском разрезе, но при разных метеорологических условиях (кривые 2—5).

Как видно, ближе к теоретической кривой располагается кривая 2, полученная при сплошной облачности в зимнее время и наибольшие расхождения наблюдались с кривой 5 для летнего периода при ясном или малооблачном небе, т. е. при значительной термической неустойчивости. Такое расхождение между нашими

данными и теоретическими следовало ожидать, так как кривая *I* построена для изотермических условий, что чаще всего имеет место в зимнее время. Приведенные сопоставления показывают, что расхождение между теоретическими и экспериментальными профилями довольно большое. Один из возможных путей получения реальных профилей скорости ветра из решения уравнения плоско-параллельной струи состоит в использовании несколько другой гипотезы об изменении масштаба турбулентности.

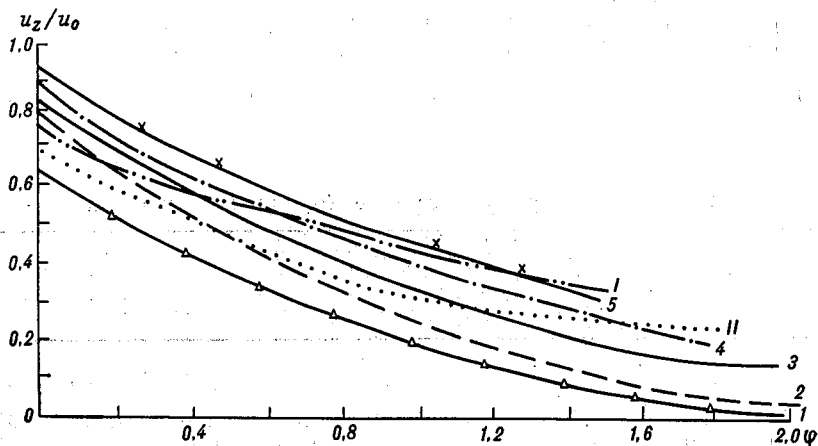


Рис. 3. Зависимость отношения скорости воздушных потоков в карьере к скорости ветра на поверхности u_z/u_0 от величины безразмерного параметра φ .

I — профиль при $a_1 = 1,0$, $a_2 = -0,1$; *II* — профиль при $a_1 = 1,0$, $a_2 = 0,1$. *I* — теоретическая, 2 — облачность, 10/10—10/6 (декабрь), 3 — 0/0—5/3 (декабрь), 4 — 10/10—10/8 (август), 5 — 0/0—5/3 (август). φ — безразмерный параметр, α — коэффициент структуры струи, определяемый из опыта.

Формула для расчета масштаба турбулентности l обычно имеет следующий вид:

$$l = \frac{\overline{w} \tau_w}{2}, \quad (10)$$

где $\overline{w}$ — вертикальная скорость; τ_w — время сохранения пульсации.

Поскольку величина l (табл. 9) и высота имеют размерности длины, наиболее простая связь между ними может быть выражена зависимостью

$$l = \kappa z, \quad (11)$$

где κ — безразмерная постоянная.

Вблизи подстилающей поверхности $\kappa = 0,38$. Эту величину принято называть постоянной Кармана.

В первом приближении для Коркинского карьера можно принять (табл. 10) в среднем слое от дна до высоты 350 м для зимнего периода и утренних часов летнего периода $\kappa = 0,07 \div 0,08$; для

Таблица 9

Средние значения l в Коркинском карьере

Слой, м		Часы суток							
от	до	7—9	9—11	11—15	15—17	17—19	9—11	11—15	15—17
		Август					Декабрь		
—300	—200	5	5	11	10	15	5	7	9
—200	—100	12	13	31	31	34	6	13	12
—100	0	20	18	34	52	36	11	15	13
0	100	30	21	36	37	30	—	11	24

Таблица 10

Значения κ на разной глубине Коркинского карьера

Высота середины слоя, м	Часы суток							
	7—9	9—11	11—15	15—17	17—19	9—11	11—15	15—17
		Август				Декабрь		
50	0,10	0,10	0,20	0,20	0,30	0,10	0,14	0,18
150	0,07	0,09	0,21	0,21	0,23	0,04	0,09	0,08
250	0,08	0,07	0,14	0,21	0,24	0,04	0,06	0,05
350	0,09	0,06	0,10	0,11	0,09	—	0,04	0,07

дневных часов зимнего периода и вечерних часов летнего периода $\kappa = 0,10 \div 0,20$. Как видим, коэффициент пропорциональности κ меняется почти в 3 раза в зависимости от времени суток и года. Если предположить, что масштаб турбулентности меняется с высотой, т. е.

$$l(x, y) = c_1 x + c_2 y, \quad (12)$$

то уравнение примет вид

$$F'''(a_1 + a_2 \varphi) + F = 0, \quad (13)$$

где a_1 и a_2 — const.

При $a_1 = 1$ и $a_2 = 0$ получаем уравнение (8) и кривую l на рис. 3. Значения параметра c_2 в формуле (12) выбираются по экспериментальным данным. Коэффициенты a_1 и a_2 однозначно определяются величинами c_1 и c_2 . Вид формулы (12) позволяет учитывать изменение масштаба турбулентности в зависимости от температурной стратификации атмосферы.

В отличие от уравнения (8), коэффициент при старшей производной в уравнении (13) зависит от независимой переменной и поэтому для уравнения (13) уже не удастся написать общее решение в виде аналитического выражения.

Уравнение (13) решалось численно методом Рунге-Кутты на ЭВММ-220. На внешней границе пограничного слоя ($\varphi = \varphi_1$) задавались следующие условия:

1) составляющая скорости по оси $x(u)$ равна скорости невозмущенного потока (u_0), т. е. $F'(\varphi_1) = 1$;

2) составляющая скорости по оси $y(v)$ равна нулю, т. е. $F(\varphi_1) = \varphi_1$;

3) градиент составляющей скорости по оси $x(du/dy)$ равен нулю, т. е. $F''(\varphi_1) = 0$.

Сопоставление (рис. 3) теоретической кривой I с экспериментальными I и II позволяет сделать вывод, что уравнение (13) дает качественно более правильное распределение ветра в разрезе. Видно также, что профиль II ближе соответствует зимним условиям, а профиль I — летним.

По рис. 3 можно для соответствующих значений φ определить и отношение u_z/u_0 . Так, при одних и тех же значениях уменьшение скорости ветра в карьере происходит летом значительно медленнее, чем зимой, и всюду меньше, чем по результатам расчета обычным методом (без учета масштаба турбулентности атмосферы).

Приведенные выше результаты экспериментальных исследований представляют большой интерес для изучения процессов формирования ветрового режима и турбулентности в глубоких карьерах. К сожалению, эти исследования были проведены только в одном карьере в районе Среднего Урала, и поэтому для более уверенной экстраполяции полученных материалов в дальнейшем желательно было бы провести такие же исследования в карьерах с иной геометрией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Н. Ф., Безлюдова Л. В. Некоторые особенности метеорологического режима Коркинского карьера. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
2. Воронцов П. А. и др. О турбулентности и вертикальных токах воздуха в Коркинском карьере в дневные часы. — Труды НИИОГР, Челябинск, 1969.
3. Воронцов П. А., Курпакова Т. А., Честная И. И. Структура воздушного потока в Коркинском карьере в дневные часы. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
4. Вагер Б. Г., Воронцов П. А. Некоторые уточнения теории плоско-параллельной струи. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
5. Воронцов П. А., Селицкая В. И., Честная И. И. Учет экспериментальных данных при расчете естественного воздухообмена в карьере. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.

Л. В. БЕЗЛЮДОВА, Н. Ф. БЕЛОВ

АНАЛИЗ КЛИМАТООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ, ПРИ КОТОРЫХ ФОРМИРУЮТСЯ ИНВЕРСИИ В КОРКИНСКОМ УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ

Известно, что нарушение воздухообмена в карьере наблюдается обычно при устойчивой стратификации воздушного объема последнего. Изучению процессов формирования инверсий в глубоких карьерах в настоящее время уделяется много внимания.

В данной работе исследуется возможность применения метода климатообразующих процессов, предложенного А. П. Гальцовым [1], к анализу условий формирования температурных инверсий на примере Коркинского угольного разреза.

Этот метод удобен тем, что анализ климатообразующих процессов может быть выполнен по материалам стандартных метеорологических наблюдений, причем признаки процессов отличаются такой конкретностью, которая позволяет выполнить первичный анализ счетными машинами.

Для исследования был использован материал (ТМ-1) за четырехлетний период (октябрь — декабрь 1966—1969 гг.). Обработка материала производилась в точном соответствии с методом А. П. Гальцова, поэтому на ней останавливаться в данной работе не имеет смысла. Результаты сведены в табл. 1.

В таблице приведена повторяемость различных межсуточных процессов за указанный период для двух точек разреза (поверхность и дно). Из нее видно, что повторяемость процессов как на поверхности, так и на дне примерно одна и та же. Из общего числа случаев на группу нейтрального равновесия пришлось около 20%.

Полное или почти полное совпадение температуры, упругости водяного пара и относительной влажности воздуха в одни и те же сроки двух последовательных суток, называемое процессом нейтрального равновесия, может быть физически закономерным или случайным.

Прежде всего такое равновесие может установиться при интенсивном радиационном обмене деятельной поверхности с атмосферой. Этот обмен имеет ясно выраженный суточный ход, но за

Таблица 1

Повторяемость различных межсуточных процессов зимой

Группа процессов	Тип процесса	Число случаев		Повторяемость, %	
		поверх- ность	дно	поверх- ность	дно
Нейтральное равновесие	H^p	133	141		
	$H_{ат}$	75	85		
	H_a^x	40	29		
	H_a	47	48		
Всего		295	303	19,8	20,3
Адвекция тепла	A^T	287	306		
	$A^{T'}$	37	17		
	A_p^T	149	152		
	A_{Φ}^T	17	11		
Всего		473	475	32,2	32,2
Адвекция холода	A^x	334	305		
	A_p^x	78	95		
	A_x^x	96	107		
Всего		508	507	35,1	35,1
Смена адвекций	A_x^T	39	21		
	A_T^x	19	11		
Всего		58	32	4,9	2,1
Трансформация прогрева	T^T	10	6		
	T_z^T	25	15		
Всего		35	21	2,4	1,4
Трансформация выхолаживания	T^x	34	16		
	T_d^x	20	17		
Всего		54	33	3,2	2,1
Фёновыи эффект	Φ^T	20	11		
Всего		20	11	1,4	0,8
Исключено из анализа (за счет отсутствия наблю- дений и ошибок наблю- дений)		29	90	2,0	6,0
Общая сумма		1472	1472	100	100

сутки положительный баланс дневного нагревания в точности уравнивается отрицательным балансом вечернего и ночного охлаждения. Из общего числа процессов нейтрального равновесия на процесс H^p приходится около 42%.

Нейтральное равновесие может характеризоваться также полной или почти полной неизменностью указанных трех элементов в течение четырех междусрочных интервалов. Это возможно при сплошной низкой облачности в течение круглых суток и при вполне установившемся тепловом равновесии в нижнем слое атмосферы.

Подобного рода условия возникают чаще всего в результате прихода теплого воздуха (в холодную половину года), т. е. при адвекции тепла в предшествовавшие сутки ($H_{ат}$). Значительно реже эти условия наблюдаются после адвекции холода (H_A^x).

Из общего числа процессов нейтрального равновесия на тип процесса $H_{ат}$ приходится около 27%, на тип H_A^x — всего 12%.

Четвертый тип нейтрального равновесия H^a представляет уже в известной степени случайное явление. При типе H^a межсуточная разность в следующий срок наблюдений никогда не бывает равна нулю. Тип H^a представляет лишь признак коренного перелома климатического процесса и не имеет самостоятельного генетического значения. Повторяемость типа процесса H^a составила 16% из общего числа процессов нейтрального равновесия.

Группа процессов адвекции тепла объединяет четыре типа процессов, общим для всех этих типов является действие в явной и маскированной форме адвекции тепла, которая определяет межсуточное повышение температуры и абсолютной влажности. Эта группа процессов за исследуемый период наблюдалась в 473 случаях, т. е. повторяемость ее достигла 32,2%, причем в 287 случаях адвекция тепла проявлялась в чистом виде (A^T).

Группа адвекции холода объединяет три типа межсуточных процессов, каждый из которых связан с межсуточным уменьшением температуры и абсолютной влажности. Процесс чистой адвекции холода (A^x) характеризуется межсуточным уменьшением также и относительной влажности.

Группа адвекции холода наблюдалась в 508 случаях, что составило 35% общего числа проанализированных случаев.

Следовательно, адвекция холода в районе Коркинского карьера наблюдается так же часто, как и адвекция тепла, повторяемость их в сумме составила около 70%. На остальные процессы пришлось около 12%, из них на группу смены адвекции — только 4%.

Для данного исследования наибольший интерес представляли процессы, с которыми связано межсуточное повышение температуры воздуха. К этим процессам были отнесены типы A^T , A_p^T , A_ϕ^T , Φ^T , T^T , а также типы $H_{ат}$ и A_x^T . Выделение последних двух типов объясняется тем, что они связаны с действием адвекции тепла. При типе $H_{ат}$ адвекция тепла действовала не в данном, а в предшествовавшем интервале времени, причем условия погоды за по-

следние 24 часа оставались неизменными в силу условий равновесия. При типе A_x^T адвекция тепла, сменившая адвекцию холода, действует как раз в конце межсуточного интервала, к которому отнесен и тип погоды.

Таким образом, по типам межсуточных процессов в группу адвекции тепла было включено 659 случаев.

Анализ условий погоды, сопровождающих межсуточное повышение температуры, показал, что в 70% случаев оно наблюдается при южных и юго-западных ветрах. При этом повторяемость слабых ветров (до 4 м/сек.) составляет 57%, ветров скоростью 5 м/сек. и более — 43%. Наиболее часто межсуточное повышение температуры наблюдается при пасмурном небе (66%); при ясном и полужасном небе повышение отмечалось лишь в 23% случаев.

Из общего числа случаев было выделено 94 случая одновременных адвекций тепла, т. е. осуществившихся в течение определенного промежутка времени. При этом продолжительность адвекции тепла в часах равномерно распределилась между тремя месяцами.

Адвекции тепла весьма различаются по продолжительности (рис. 1). Наибольшая повторяемость приходится на адвекцию тепла продолжительностью около 24 час., наименьшая — на адвекцию тепла продолжительностью от 100 до 150 час.

Межсуточное повышение температуры воздуха колеблется в весьма широких пределах, от 17,9 до $-2,9^{\circ}\text{C}$, причем отрицательные значения чаще всего связаны с процессом A_x^T . Наибольшая повторяемость (44%) приходится на межсуточное повышение температуры от 0 до $2,9^{\circ}\text{C}$. В 29% случаев температура за сутки повышается в среднем на $4,5^{\circ}\text{C}$, в 12% случаев — на $7,5^{\circ}\text{C}$.

Стратификация воздушного объема в карьере характеризовалась значением условного вертикального градиента температуры ($\gamma_{\text{усл}}$), который представляет разность температур воздуха в двух точках (дно — поверхность) и относится к 300-метровому слою.

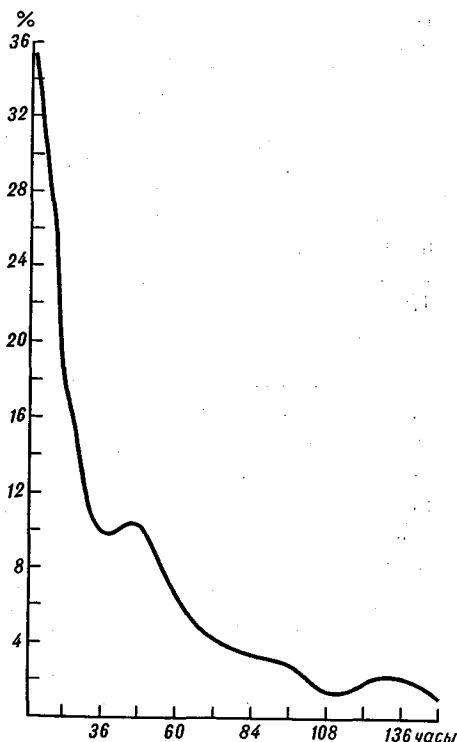


Рис. 1. Повторяемость адвекций тепла различной продолжительности.

Если величина $\gamma_{\text{усл}}$ в данный срок была меньше нуля, считалось, что в этот срок в карьере было инверсионное распределение температуры воздуха.

Проанализировав всю картотеку по $\gamma_{\text{усл}}$, за период с октября по декабрь 1966—1969 гг. выявили 44 случая с единовременной инверсией температуры.

Инверсии значительно различаются по продолжительности и интенсивности.

Оказалось, что наиболее часто встречаются инверсии продолжительностью от 6 до 12 час. Однако инверсионное распределение температуры может удерживаться и более 200 час. Из общего числа проанализированных случаев на такие продолжительные инверсии пришлось 4,6%, а на инверсии, которые сохраняются примерно в течение четырех суток — 11,3%.

По интенсивности инверсии также распределены неравномерно. Наибольшая повторяемость (около 50%) приходится на $\gamma_{\text{усл}} \leq -1,0^\circ\text{C}$ на 300 м; велика также повторяемость (42,6%) инверсий, интенсивность которых меняется от $-1,1$ до $-6,0^\circ\text{C}$, и совсем мала повторяемость инверсий, при которых $\gamma_{\text{усл}}$ меняется от -10 до -15°C на 300 м.

За исследуемый период для каждого случая инверсии были установлены:

1) тип межсуточного процесса, подготовившего образование инверсии в течение 24 час.;

2) тип междусуточного процесса, развившегося в интервале между двумя соседними сроками наблюдений и послужившего непосредственным толчком к образованию инверсии.

Сопоставление межсуточных и междусуточных типов процессов при возникновении температурной инверсии (табл. 2) показало, что процессы подготовки образования инверсии находятся в теснейшей связи с процессами, непосредственно обусловившими ее

Таблица 2
Типы процессов, приводящие к образованию инверсий

Междусуточные типы процессов	Межсуточные типы процессов						Всего случаев
	H	Φ	A^T	A^X	T^T	T^X	
a^T	2		11	2			15
$a^T p^X$			2				2
n	1			4			5
a^X			1				1
p^T	1		6	1	3	1	12
p^X			3	2	1		6
ϕ		3					3
Всего случаев	4	3	23	9	4	1	44

формирование. По междусрочным процессам причиной возникновения инверсии является адвекция тепла.

К группе процессов адвекции тепла по междусрочным процессам можно отнести типы n , p^* , ϕ .

Из анализа табл. 2 видно, что в 30 случаях адвекция тепла способствовала образованию инверсии. В одном случае образованию инверсии предшествовала адвекция холода по междусрочному процессу, но осуществлялась она на фоне межсуточного повышения температуры и смогла понизить условный вертикальный градиент только до $-0,5^\circ\text{C}$ на 300 м.

Из 44 случаев шесть приходятся по междусрочным процессам на радиационное выхолаживание, причем в трех случаях оно происходит на фоне межсуточной адвекции тепла. В двух случаях радиационное выхолаживание, происходившее на фоне адвекции холода, способствовало образованию инверсии. Более подробный анализ этих случаев показал, что они также связаны с адвекцией тепла, но настолько кратковременной, что она не нашла своего отражения в межсуточных процессах.

Межсуточные процессы повышения температуры (адвекции тепла), однако, не всегда приводят к возникновению инверсий.

За исследуемый период с октября по декабрь 1966—1969 гг. осуществилось 94 адвекции тепла.

Из табл. 3, отражающей распределение условного вертикального градиента температуры при 94 процессах межсуточного повышения температуры, при сопровождающих эти процессы погодных характеристиках удалось отметить следующее. В 44 случаях адвекция тепла привела к образованию инверсии, в 34 приблизила стратификацию воздуха в карьере к инверсионному состоянию. В 16 случаях адвекция тепла не нарушила нормального падения температуры воздуха с высотой. В 5 случаях из этих 16 адвекция тепла осуществлялась при скорости ветра более 5 м/сек., в 11 случаях адвекция тепла сопровождалась выпадением осадков.

Сильный ветер и осадки способствуют теплообмену между верхними и нижними слоями воздуха в карьере, что приводит к нормальному распределению температуры воздуха с высотой.

За исследуемый период не обнаружено адвекций тепла при некоторых направлениях ветра, поэтому эти случаи не вошли в таблицу.

Наиболее благоприятные условия для образования инверсии в карьере наблюдаются при ясном небе, когда адвекция тепла действует совместно с радиационным нагреванием. Из 44 инверсий 24 образовались при ясном и полужасном небе, 9 — при переменной облачности, 10 — при пасмурном небе.

Наиболее часто инверсии образуются при южных и юго-западных ветрах небольшой скорости, 4 м/сек. и менее; а при скоростях 5 м/сек. и более в связи с усилением турбулентного обмена инверсии редки.

При малооблачной погоде $\gamma_{\text{усл}}$ меняется в весьма широких пределах, от 0 до -10°C на 300 м, при полужасном небе и переменной

Таблица 3

Распределение $\gamma_{\text{ул}}$ при адвекции тепла

Погода			γ _{ул} °C (от — до)								
состояние неба	направ- ление ветра	ско- рость, м/сек.	5,9 4,0	3,9 2,0	1,9 0,0	0,0 —1,9	—2,0 —3,9	—4,0 —5,9	—6,0 —7,9	—8,0 —8,9	<—10
Ясное	С	2—4 5—10		1	1						
	ЮВ	2—4			1		1				
	Ю	2—4						1			
	ЮЗ	0—1 2—4 5—10			2	5 1 1	3		2	1	
	З	2—4				1					2
	СЗ	0—1 2—4 5—10			1						
Полуясное	Ю	2—4 5—10				1 1	1				
	ЮЗ	2—4 5—10			1 ^{ос} 1	1 1	1				
	СЗ	2—4				1					
Переменная облачность	С	2—4		1 ^{ос}							
	СВ	2—4		1 ^{ос}							
	Ю	2—4 5—10			1 ^{ос} 1	2 ^{ос} , 1 1					
	ЮЗ	2—4 5—10			2 1 ^{ос}	1 2	1	1			
Пасмурно	С	2—4 5—10		1 ^{ос} 1							
	СВ	2—4 5—10		1 ^{ос} 1 ^{ос}							
	В	2—4			1	2		1 ^{ос}			
	ЮВ	5—10		1 ^{ос}	1						
	Ю	2—4 5—10		3 ^{ос} 1 ^{ос} , 2	1 2	1, 1 ^{ос} 1	1	1			
	ЮЗ	2—4 5—10			5 3, 2 ^{ос} 2, 1 ^{ос}		2 ^{ос}				
	З	2—4									
	СЗ	5—10 2—4			1 2						

Примечание. Индекс „^{ос}“ означает осадки.

облачности границы изменения $\gamma_{\text{ул}}$ заметно сужаются, от 0 до —3,9°С на 300 м. Из 34 адвекций тепла, которые только уменьшили величину $\gamma_{\text{ул}}$, в 22 случаях адвекция тепла осуществлялась при пасмурном небе.

Анализ материала показал, что возникновение температурных инверсий связано с процессами, определяющими межсуточное повышение температуры, чаще всего с адвекцией тепла. Была сделана попытка связать количественно изменение условного вертикального градиента с межсуточным повышением температуры.

Между межсуточным изменением условного вертикального градиента и межсуточным повышением температуры существует линейная связь. Поэтому для нахождения коэффициентов в линейном уравнении удобнее всего использовать метод наименьших квадратов. Для оценки связи между межсуточным повышением температуры воздуха и изменением условного вертикального градиента вычислялся коэффициент корреляции.

Из всего материала наблюдений с октября по декабрь 1966—1969 гг. были выбраны по срокам случаи с межсуточным повышением температуры. Эти случаи были разбиты на группы по признакам:

- 1) скорость ветра 4 м/сек. и менее и отсутствие осадков;
- 2) осадки при любой скорости ветра;
- 3) скорость ветра 5 м/сек. и более.

Отдельно анализировались случаи по срокам: 6—6 и 12—12 час. Именно в 6 и 12 час. чаще всего отмечается инверсия. Были получены следующие уравнения связи.

Межсуточное повышение температуры воздуха в период 6—6 час.

1. При скорости ветра 4 м/сек. и менее и отсутствии осадков

$$\Delta\gamma_{\text{усл}, 6-6} = -0,24 - 0,46\Delta\theta_{6-6},$$

$$r_{12} = -0,79,$$

где $\Delta\gamma_{\text{усл}, 6-6}$ — изменение величины условного вертикального градиента в течение суток с 6 до 6 час., $\Delta\theta_{6-6}$ — межсуточное повышение температуры воздуха на поверхности карьера с 6 до 6 час., r_{12} — коэффициент корреляции между $\Delta\gamma_{\text{усл}}$ и $\Delta\theta$.

2. При осадках и любой скорости ветра

$$\Delta\gamma_{\text{усл}, 6-6} = -0,36 - 0,08\Delta\theta_{6-6},$$

$$r_{12} = -0,36.$$

3. При скорости ветра 5 м/сек. и более

$$\Delta\gamma_{\text{усл}, 6-6} = -0,36 - 0,04\Delta\theta_{6-6},$$

$$r_{12} = -0,08.$$

Во всех остальных случаях обозначения те же.

Межсуточное повышение температуры воздуха в период 12—12 час.

1. При скорости ветра 4 м/сек. и отсутствии осадков

$$\Delta\gamma_{\text{усл}, 12-12} = -1,27 - 0,39\Delta\theta_{12-12},$$

$$r_{12} = -0,60.$$

2. При осадках и любой скорости ветра

$$\Delta\gamma_{\text{усл.}, 12-12} = -0,52 - 0,09\Delta\theta_{12-12},$$
$$r_{12} = -0,33.$$

3. При скорости ветра 5 м/сек. и более

$$\Delta\gamma_{\text{усл.}, 12-12} = -0,13 - 0,04\Delta\theta_{12-12},$$
$$r_{12} = -0,10.$$

Как и следовало ожидать, довольно тесная корреляционная связь существует между межсуточным повышением температуры и понижением условного вертикального градиента лишь при слабых скоростях ветра и отсутствии осадков.

В заключение отметим следующее:

1) повторяемость климатообразующих процессов на поверхности и внутри разреза примерно одинакова;

2) метод позволяет четко выделять процессы, характеризующие межсуточное повышение температуры;

3) между образованием инверсий и процессами, приводящими к межсуточному повышению температуры, существует определенная взаимосвязь.

Инверсии образуются чаще всего при адвекции тепла, осуществляющейся при слабых скоростях ветра и при отсутствии осадков.

Полученные результаты указывают на перспективность применения метода климатообразующих процессов наряду с другими методами для анализа формирования температурных инверсий в глубоких карьерах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальцов А. П. Анализ климатообразующих процессов. М., Изд. АН СССР, 1957.

ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ В КОРКИНСКОМ КАРЬЕРЕ

Повышение удельного веса открытых горных работ в общей добыче полезных ископаемых выдвинуло перед горной наукой и практикой задачу создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда в карьерах. В связи с этим возникла необходимость в изучении процессов, формирующих воздухообмен в последних. В настоящее время стало ясно, что нарушение воздухообмена в карьере наблюдается при формировании устойчивой стратификации в его воздушном объеме. Однако механизм формирования инверсий до сих пор неясен.

В настоящей работе на примере Коркинского угольного карьера исследуются особенности суточного хода температуры в течение года при различных условиях погоды. Изучение суточного хода температуры является необходимым в анализе механизма формирования инверсий в карьерах.

Хорошо выраженный суточный ход температуры обусловлен изменением притока тепла от Солнца к земной поверхности и атмосфере в течение суток. Процессы радиационного нагревания днем и выхолаживания ночью являются периодическими и обуславливают нормальный суточный ход температуры воздуха. Дневное распределение температуры, связанное с этими процессами, получило название инсоляционного типа распределения, ночное — радиационного [3]. Однако периодический суточный ход часто нарушается под влиянием непериодических процессов, к которым можно отнести процессы адвекции тепла и холода и некоторые другие.

Для выявления особенностей суточного хода температуры в Коркинском карьере необходимо было решить две задачи:

- 1) найти закономерности суточного хода температуры воздуха в нем по сезонам в ясные и пасмурные дни;
- 2) выявить особенности суточного хода температуры воздуха в нем в результате различных непериодических процессов.

Для анализа суточного хода температуры воздуха была использована методика, предложенная О. П. Глазовой [4].

Для характеристики процессов, обусловивших тот или иной ход температуры воздуха, был применен метод межсуточных процессов, разработанный А. П. Гальцовым [2]. Метод, предложенный Гальцовым, удобен тем, что анализ климатообразующих процессов может быть выполнен по материалам стандартных метеорологических наблюдений без привлечения каких-либо других материалов, причем признаки процессов отличаются такой конкретностью, которая позволяет выполнить первичный анализ счетными машинами.

При анализе межсуточных процессов Гальцов уделяет большое внимание процессу нейтрального равновесия радиационного типа. Он считает, что процесс этого типа (H^p), характерный для фундаментального типа погоды, представляет конечную стадию трансформации всех воздушных масс и по средней суточной температуре, при которой он отмечается, можно судить о температуре лучистого равновесия в данной местности в данное время года.

Обработывая материал (ТМ-1) стандартных метеорологических наблюдений на ст. Коркино в двух точках (дно, бровка), использовали метод картотеки; анализ полученного материала проводился по методу Гальцова.

За период наблюдений с 1966 по 1969 г. для каждого дня были выделены типы междусуточных и межсуточных процессов, которые были сгруппированы по определенным признакам в группы: нейтрального равновесия, адвекции тепла и холода и другие. Для каждой группы процессов были рассмотрены погодные характеристики (направление ветра, облачность, осадки). В результате анализа материала можно было сделать вывод, что полученные межсуточные процессы не противоречат погодным характеристикам, а, наоборот, находятся в соответствии с ними. Летом на процессы нейтрального равновесия пришлось 26% общего числа случаев, адвекции тепла — 28%, холода — 16%, фёновые процессы — 10%, на остальные — в сумме 18%; в холодное полугодие на процессы адвекции тепла пришлось 32% случаев, холода — 35%, нейтрального равновесия — 29%, на остальные — 4%. Преобладание летом и зимой одних и тех же межсуточных процессов связано с характером циркуляции над территорией Южного Урала. По исследованиям И. Я. Аликиной [1], повторяемость одних и тех же типов циркуляции примерно одинакова по сезонам. Кроме того, поскольку для зимнего периода характерно некоторое преобладание антициклоничности и связанной с ней ясной погоды, то зимой процесс H^p отмечается чаще, чем летом.

Выявив типы процессов, можно было приступить к анализу суточного хода температуры. Для этого, как указывалось выше, была использована методика О. П. Глазовой.

Для указанного периода были построены таблицы отклонений температуры в каждый час дня и ночи от значений температуры, наблюдавшейся соответственно в час восхода и захода Солнца. Затем из полученных таблиц были выбраны все ясные и пасмурные дни и ночи.

К каждому из выбранных случаев был подобран соответствующий межсуточный процесс. Для адвекции тепла и холода, для процесса нейтрального равновесия радиационного типа и фёнового процесса были отобраны случаи с ясным и пасмурным небом, для сравнения — некоторые случаи с переменной облачностью. Далее все случаи для данной группы процессов были проанализированы. Построены графики изменения температуры воздуха на дне и бровке карьера для ясного и пасмурного состояния неба и переменной облачности при различных типах процессов. Выделены особенности суточного хода температуры воздуха вне карьера и внутри его по сезонам.

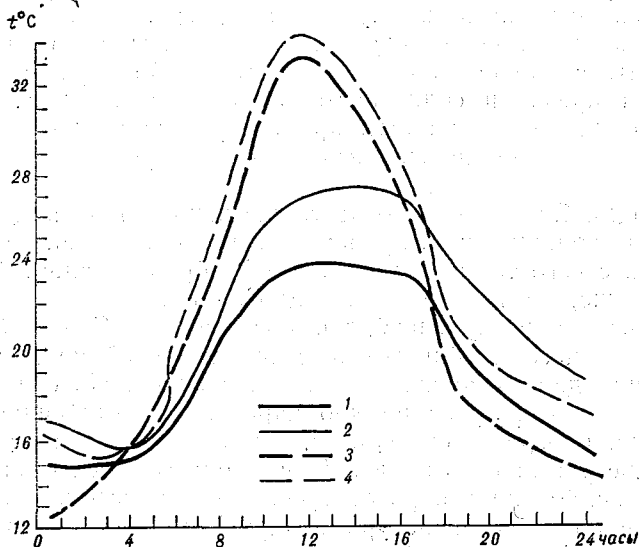


Рис. 1. Суточный ход температуры воздуха (1 и 2) и почвы (3 и 4) (Коркино, 23 VII 1967 г., ясно, H^P).
1 и 3 — бровка, 2 и 4 — дно.

Процесс H^P представляет конечную стадию трансформации всех воздушных масс и характеризуется лучистым равновесием, поэтому при этом процессе суточный ход температуры воздуха будет определяться чисто радиационными факторами. В течение всего года процесс H^P определяется симметрией кривых суточного хода температуры воздуха и почвы как на бровке, так и на дне карьера. Минимальная температура воздуха и почвы наблюдается перед восходом Солнца. Максимум температуры поверхности почвы — около полудня, т. е. в момент наибольшего прихода солнечной радиации. Максимум температуры воздуха сдвигается к 13—15 час.

Рассмотрим суточный ход температуры воздуха и почвы для карьера в летние месяцы (рис. 1). Восход Солнца для этой широты в августе приходится на 4 час. 36 мин., на дно карьера

солнечные лучи попадают позже — в 5 час. 57 мин. После восхода Солнца почва на бровке начинает интенсивно прогреваться и ее температура сравнивается с температурой подстилающей поверхности на дне карьера. Поскольку солнечные лучи еще не попали на дно карьера, температура подстилающей поверхности на дне повышается медленнее, чем на бровке. Подстилающая поверхность на дне остается холоднее в течение 1—2 час.

После того как лучи Солнца попадут на дно карьера, температура его поверхности и температура почвы на бровке сравниваются. Рост температуры поверхности почвы на дне идет быстрее, чем наверху, что объясняется малым альбедо (10%) подстилающей поверхности дна и замкнутостью карьера. В полдень температура на дне выше, чем на бровке, на 2—7°С. После 12 час. температура интенсивно понижается. В августе дно карьера перестает облучаться прямыми солнечными лучами с 15 час. 40 мин., после чего на дне начинается процесс радиационного выхолаживания и температуры поверхности почвы на бровке и на дне сближаются.

С заходом Солнца на бровке также начинается процесс радиационного выхолаживания, причем более интенсивный, чем на дне, в результате чего температура почвы на бровке падает быстрее и остается ниже, чем на дне до восхода Солнца.

Температура воздуха на бровке после восхода Солнца благодаря лучистым процессам сближается с температурой на дне карьера (рис. 1) или даже становится выше последней. Но с попаданием прямых солнечных лучей на дно карьера подстилающая поверхность в нем прогревается сильнее, чем наверху, температура воздуха на дне растет быстрее и к 14 час. оказывается выше на 4°С. После 15 час. 40 мин. в карьере начинается процесс радиационного выхолаживания и температура воздуха на дне начинает интенсивно падать. Благодаря более сильному прогреву подстилающей поверхности в карьере сближение кривых температуры воздуха в вечерние часы в двух точках не наблюдается, несмотря на то что поверхность еще освещается солнечными лучами.

После захода Солнца на бровке начинается интенсивное радиационное выхолаживание, температура воздуха падает, оставаясь в течение ночи ниже, чем на дне карьера. Радиационное выхолаживание на дне карьера меньше, так как с увеличением закрытости горизонта уменьшается эффективное излучение [3].

В октябре, в отличие от летних месяцев, Солнце почти не освещает дно карьера. На бровке восход приходится на 6 час. После восхода Солнца начинается интенсивный рост температуры поверхности почвы (рис. 2). Температуры почвы на дне и бровке сравниваются. В отличие от летних месяцев, температура почвы на бровке до захода Солнца остается выше, чем на дне. Это объясняется тем, что к моменту попадания прямых солнечных лучей на дно (9 час.) почва на бровке уже достаточно прогрета, а температура выхолаженной за ночь почвы на дне за короткий период освещенности карьера не может сравниться с температурой по-

верхности почвы на бровке карьера. Эта разница к 12 час. иногда достигает 8°C .

После захода Солнца вследствие радиационного выхолаживания температура почвы на бровке понижается интенсивнее и в течение ночи остается ниже температуры почвы на дне.

Прогрев почвы на бровке карьера в утренние часы приводит к выравниванию температур в двух точках. Благодаря инсоляции при безоблачном небе температура воздуха на бровке становится после выравнивания выше, чем на дне. Это длится до тех пор, пока воздух на дне не прогреется достаточно для того, чтобы его

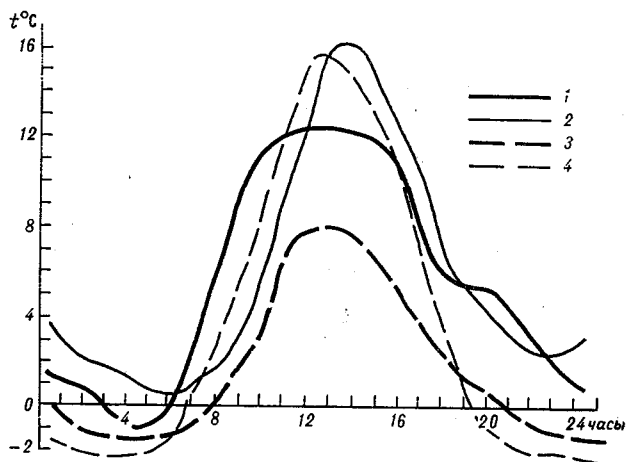


Рис. 2. Суточный ход температуры воздуха и почвы
(Коркино, 29 X 1968 г.).
Усл. обозначения см. рис. 1.

температура сравнивалась с температурой воздуха вне карьера. Разрушение инверсий в октябре происходит в околополуденные часы, т. е. к моменту максимального притока прямой солнечной радиации.

Интенсивный рост температуры воздуха в карьере начинается с момента попадания прямых солнечных лучей на дно. Достигнув максимума в полуденные часы, температура в карьере начинает понижаться, оставаясь выше на дне, чем на бровке, в течение нескольких часов облучения дна прямыми лучами.

С началом процесса радиационного выхолаживания продолжается падение температуры почвы и воздуха. Поскольку Солнце еще освещает поверхности вне карьера, происходит выравнивание температуры почвы и воздуха в двух точках, и температура воздуха остается на бровке карьера выше, чем на дне (рис. 2).

После захода Солнца благодаря процессу радиационного выхолаживания температура почвы и воздуха на бровке интенсивно падает, что приводит к выравниванию температуры воздуха в двух точках, и в результате дальнейшего понижения температуры почвы

и воздуха вечерняя инверсия разрушается. Температура воздуха на бровке остается ниже, чем на дне до восхода Солнца.

В декабре, в отличие от летних и осенних месяцев, солнечные лучи вообще не попадают на дно карьера из-за малой высоты Солнца над горизонтом. В ночные часы благодаря интенсивному процессу радиационного выхолаживания почва на бровке, а следовательно, и воздух холоднее, чем на дне. Причем перед восходом Солнца происходит выравнивание температур воздуха и почвы на бровке; на дне также происходит сближение температур почвы и воздуха.

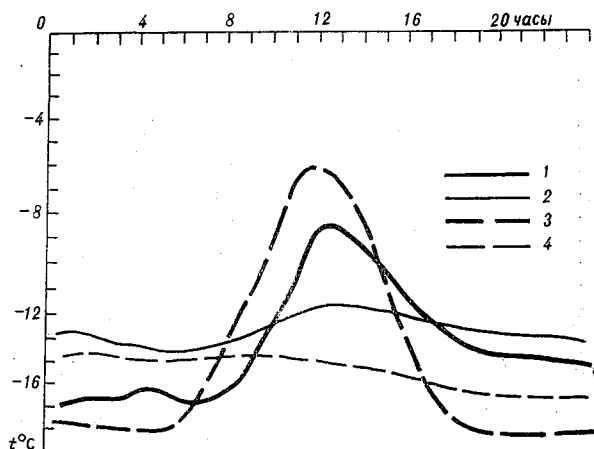


Рис. 3. Суточный ход температуры воздуха и почвы (Коркино, 7 XII 1969 г., ясно H^p).

Усл. обозначения см. рис. 1.

С восходом Солнца начинается рост температуры почвы и воздуха на бровке (рис. 3). Температура почвы на бровке сравнивается с температурой на дне после 8 час., т. е. после восхода Солнца; выравнивание температур воздуха происходит в 10 час. Поскольку солнечные лучи в декабре не проникают в карьер, в отличие от летних и осенних месяцев, температура поверхности почвы на дне испытывает очень небольшие суточные колебания.

Разница в температуре почвы на поверхности и на дне карьера составляет в полдень до 9°C (рис. 3). Благодаря инсоляции на бровке карьера происходит интенсивный рост температуры воздуха (рис. 4). Приращение температуры воздуха к 13 час. относительно температур в момент восхода Солнца составляет $8,5^{\circ}\text{C}$. Прирост температуры воздуха для дна к тому же времени относительно температуры в момент восхода Солнца составляет лишь 2°C . Вечернее выравнивание температур почвы на бровке и на дне происходит после захода Солнца, что связано с более интенсивным процессом радиационного выхолаживания вне карьера. Затем подстилающая поверхность и воздух на дне в течение ночи остаются

теплее, чем на бровке (рис. 3). Таким образом, можно отметить, что для зимних месяцев характерными являются дневные инверсии.

Подводя итог исследованию суточного хода температуры воздуха в условиях лучистого равновесия в различные сезоны года, удалось выявить следующие закономерности:

1. Летом возникновение инверсий температуры можно ожидать в ранние утренние часы до момента попадания прямых солнечных лучей на дно. Эти инверсии носят кратковременный характер, интенсивность их мала.

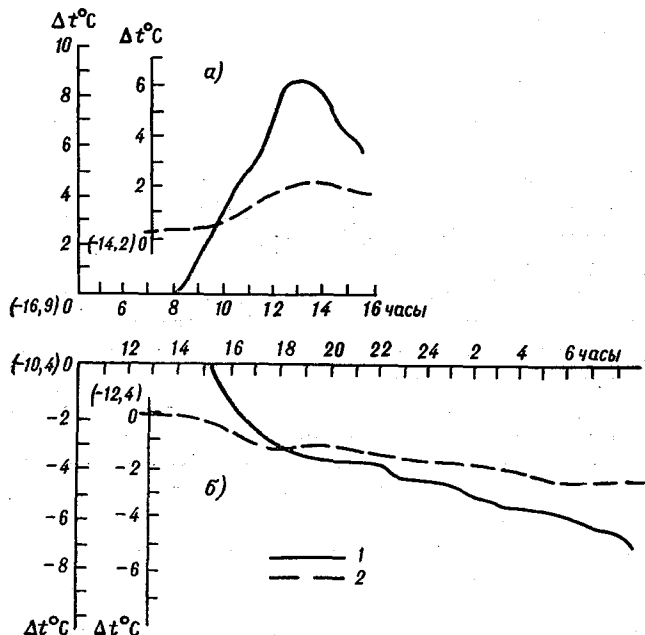


Рис. 4. Изменение температуры воздуха относительно времени восхода (а) и захода (б) Солнца (Коркино, 7 XII 1969 г., ясно, НР).

1 — поверхность, 2 — дно.

2. Осенью наблюдаются утренние и вечерние инверсии. Они тем продолжительнее, чем позже начинает освещаться прямыми лучами дно. Утренняя инверсия обычно мощнее вечерней.

3. Зимой характерными являются дневные инверсии, они возникают после восхода Солнца и разрушаются после его захода. Эти инверсии могут быть достаточно интенсивными.

Рассмотрим теперь, какое влияние на суточный ход температуры воздуха в двух точках оказывают неперiodические процессы, в частности адвекция тепла и холода.

Для Челябинской области процесс адвекции тепла имеет большую повторяемость во все сезоны года. В летний период при

процессе адвекции тепла для ясного неба так же, как при процессе нейтрального равновесия радиационного типа, температура почвы и воздуха на дне карьера выше, чем на бровке. Прирост температуры воздуха относительно температуры в момент восхода Солнца идет интенсивно благодаря суммарному действию инсоляции и адвекции тепла. В тех случаях, когда вертикальный градиент температуры воздуха в карьере достаточно велик, не происходит выравнивания температур воздуха на бровке и дне карьера, даже при адвекции тепла. Так, разница в температурах воздуха на дне и бровке 22 июня 1968 г. в 5 час. 30 мин., т. е. в момент восхода Солнца, составляла $6,5^{\circ}\text{C}$.

Если температурный градиент в карьере небольшой и адвекция тепла начинает осуществляться в утренние часы, то происходит выравнивание температур воздуха на бровке и дне карьера, а затем температура воздуха на бровке (благодаря процессам инсоляции и адвекции тепла) становится выше, чем на дне. Но после проникновения теплых воздушных масс в карьер и достаточного прогрева на дне эта инверсия разрушается. Следует отметить, что эти инверсии непродолжительны; 30 августа 1969 г. такая инверсия длилась один час.

В дневные часы при процессе адвекции тепла в условиях переменной облачности или пасмурного неба нарастание температуры относительно температуры при восходе Солнца на поверхности и дне карьера идет медленнее, чем при ясном небе.

В ночные часы при ясном небе идет интенсивное понижение температуры воздуха как на поверхности, так и на дне карьера из-за радиационного выхолаживания, которое может быть лишь ослаблено адвекцией тепла. При переменной облачности процесс радиационного выхолаживания ночью слабее, чем при ясном небе, поэтому понижение температуры воздуха на дне и поверхности в течение ночи относительно температуры при заходе Солнца меньше.

В октябре при процессе адвекции тепла суточный ход температуры воздуха и почвы такой же, как при процессе нейтрального равновесия радиационного типа. В утренние и вечерние часы также наблюдаются инверсии температуры воздуха в карьере.

Сравнив понижение температуры воздуха в двух точках в течение ночи при ясном небе для процессов нейтрального равновесия радиационного типа и адвекции тепла, можно отметить, что понижение температуры относительно температуры в момент захода Солнца при адвекции тепла меньше, чем при процессе нейтрального равновесия, поскольку в первом случае радиационное выхолаживание ослабляется адвекцией тепла. Ход кривых изменения температуры в течение ночи такой же, как при процессе нейтрального равновесия, инверсия наблюдается в вечерние часы.

В некоторых случаях в утренние часы при адвекции тепла нет инверсий, а отмечается только сближение температур воздуха в двух точках (например, осуществление адвекции тепла при силь-

ном ветре и др.). В дневные часы благодаря суммарному действию инсоляции и адвекции тепла в двух точках происходит интенсивный прирост температуры воздуха относительно температуры при восходе Солнца.

При пасмурном небе днем прирост температуры воздуха будет определяться только адвекцией, поэтому прирост меньше, чем при ясном небе. Температура поверхности почвы при пасмурном небе днем на дне будет выше, чем на бровке, так же как и температура воздуха, что объясняется отсутствием инсоляции.

В декабре днем при ясном небе при процессе адвекции тепла наблюдается инверсия, как при процессе нейтрального равновесия радиационного типа.

В ночные часы при ясном небе процесс адвекции тепла несколько ослабляет радиационное выхолаживание, тем самым улучшаются условия для возникновения дневных инверсий.

Особую группу, по А. П. Гальцову [2], составили фёноподобные ситуации, т. е. процессы, при которых междусрочные и межуточные разности температур, упругости водяного пара и относительной влажности соответствуют характеру изменения последних при фёне ($\Delta\theta > 0$, $\Delta e < 0$, $\Delta f < 0$).

Фёновый процесс оказывает на суточный ход температуры воздуха такое же влияние, как адвекция тепла. Для летних месяцев фёновый эффект наблюдается обычно в два срока, т. е. в 0—6 и 6—12 час. Если фёновый процесс наблюдается в срок 0—6 час., то прирост температуры воздуха на поверхности начинается еще до восхода Солнца, усиливаясь затем с его восходом. В тех случаях, когда в карьере отмечается небольшой градиент температуры воздуха (1,0—2,0° С/300 м), в утренние часы происходит выравнивание температур воздуха на бровке и дне карьера. Если этот момент совпадает с началом фёнового процесса, то это приводит к образованию непродолжительных инверсий. При фёновых явлениях прирост температуры днем относительно температуры при восходе Солнца идет быстрее, чем при процессе нейтрального равновесия радиационного типа, поскольку в первом случае прирост температуры определяется двумя процессами — адвекцией теплого воздуха сверху и радиационным нагреванием.

Процесс адвекции холода по повторяемости сравним с процессом адвекции тепла. В летние месяцы процесс адвекции холода сопровождается в основном переменной облачностью. Благодаря радиационному нагреванию подстилающей поверхности на бровке температура воздуха в карьере повышается относительно температуры при восходе Солнца, несмотря на адвекцию холода. В ночные часы из-за суммарного действия процессов радиационного выхолаживания и адвекции холода при ясном небе температура воздуха интенсивно понижается. Сравнивая понижения температур воздуха в условиях ясного неба при адвекции холода и процессе нейтрального равновесия радиационного типа, можно отметить, что в первом случае понижение значительно больше.

Днем при адвекции холода и пасмурном небе происходит понижение температуры воздуха относительно температуры при восходе Солнца как на бровке, так и на дне, поскольку нет влияния инсоляции.

Процесс адвекции холода в октябре оказывает большое влияние на суточный ход температуры воздуха в карьере. Сравнив ход температуры воздуха в карьере при процессе нейтрального равновесия радиационного типа с ходом при адвекции холода, можно отметить, что температура воздуха при адвекции холода остается в течение суток ниже на бровке, чем на дне карьера. В то время как при процессе нейтрального равновесия радиационного типа в утренние и вечерние часы отмечаются инверсии, при адвекции их нет, поскольку температура воздуха на бровке в течение суток остается ниже, чем на дне.

В декабре при процессе нейтрального равновесия температура воздуха в дневные часы на бровке выше, чем на дне, так как зимой солнечные лучи не проникают в карьер. При адвекции холода температура почвы на бровке остается выше, чем на дне, благодаря процессам инсоляции, вследствие чего температура воздуха на поверхности выше, чем на дне при адвекции холода. Поэтому в дневные часы могут наблюдаться инверсии даже при адвекции холода, но они менее продолжительные. В ночные часы при безоблачном небе и адвекции холода после захода Солнца на бровке падение температуры воздуха относительно температуры в момент захода Солнца идет быстрее, чем на дне, благодаря более интенсивному радиационному выхолаживанию на поверхности, усиленному адвекцией холода.

Анализ суточного хода температуры воздуха при процессах нейтрального равновесия радиационного типа показал, что температурные инверсии в карьере являются следствием радиационных процессов. Благодаря особенностям радиационного режима карьера, связанного с его формой, эти процессы по-разному проявляются на дне и поверхности карьера. Температурные инверсии, таким образом, являются составной частью суточного хода температуры воздуха.

Непериодические процессы лишь накладывают определенный отпечаток на суточный ход температуры, тем самым усиливая или ослабляя инверсии, а не служат самостоятельной причиной их образования.

Процесс адвекции тепла во все сезоны года лишь усиливает инверсию, если начало адвекции совпадает со временем образования инверсии. Однако в летний сезон при начале адвекции тепла или фёнового эффекта в ясный день в утренние часы могут возникать лишь кратковременные инверсии. После восхода Солнца эти инверсии быстро разрушаются.

Адвекция холода в переходные сезоны и зимний период разрушает инверсию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аликина И. Я. Повторяемость барических образований на Среднем и Южном Урале при основных формах циркуляции. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 11.
2. Гальцов А. П. Анализ климатообразующих процессов. М., Изд. АН СССР, 1957.
3. Гейгер Р. Климат приземного слоя воздуха. М., 1960.
4. Глазова О. П. О суточном ходе температуры воздуха. — Труды ЦИП, 1958, вып. 69.
5. Федоров Е. Е. Типы погоды при разных воздушных массах на примере одной местности (К вопросу о генезисе климата). — Труды Института физ. географии, 1935, вып. 14.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МИКРОКЛИМАТА РАБОЧИХ МЕСТ В ЮЖНЫХ КАРЬЕРАХ

В комплексе факторов, определяющих санитарно-гигиенические условия труда на открытых горных разработках, определенное место занимает микроклимат на рабочих местах, влияющий не только на здоровье людей, но и на производительность труда и безопасность работ.

Одним из центральных вопросов биометеорологии карьеров является изучение влияния микро- и макрометеорологических факторов на тепловой режим рабочих мест как на открытом воздухе, так и в кабинах горного оборудования (машин, самосвалов и др.). В настоящее время почти не исследован тепловой режим рабочих мест в карьерах в зависимости от всего комплекса метеорологических факторов, имеющих место в карьерах. Методы учета климатических условий при проектировании разного рода оборудования, занятого в карьерах, определяются главным образом СН и П и не учитывают микроклиматические особенности карьеров и рабочих участков.

Необходимость детального изучения особенностей микроклимата рабочих мест диктуется увеличением объемов открытых горных разработок и возникает из практических задач по созданию эффективных средств защиты человека от неблагоприятных метеорологических условий в карьерах.

Метеорологические факторы, оказывающие влияние на тепловой режим рабочих мест, можно разделить на две группы: 1) радиационные, 2) турбулентного теплообмена. В условиях южных районов радиационные факторы приобретают важное значение.

Среди разнообразных методов оценки теплового режима рабочих мест, расположенных под открытым небом, заслуживает внимания широко распространенная в гигиенической практике интегральная характеристика — температура черного шара [1], учитывающая влияние трех факторов: температуры воздуха, скорости ветра и потоков радиации. Для выявления особенностей микроклимата рабочих участков были произведены экспериментальные измерения на двух карьерах, расположенных в Южном Казахстане (Акса́й) и Средней Азии (Кургаши́нкан).

Исследования предусматривали измерение температуры черного шара ($t_{ш}$), суммарной (S), рассеянной (D) и отраженной радиации почвы (r) и борта ($r_б$), температуры воздуха ($t_{в}$), температуры поверхности почвы ($t_{п}$) и борта ($t_б$), скорости ветра (v).

Измерения проводились в течение суток в наиболее характерных точках карьера и за его пределами на открытой площадке. В табл. 1 приведены микрометеорологические параметры, характеризующие тепловой режим карьеров, для дневных условий летнего безоблачного дня.

Таблица 1

Значение микрометеорологических параметров, определяющих тепловой режим карьеров

Место наблюдения	S	D	r	r_6	$t_{\text{п}}$	t_6	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{ш}}$	v м/сек
	кал/см ² ·мин				°C				

Акса́й

Поверхность . . .	1,22	0,25	0,25	—	61,7	—	34,0	42,5	2,9
Дно	1,10	0,27	0,21	—	54,8	—	35,8	46,5	1,8
Северный борт	1,08	0,21	0,20	0,18	57,8	48,0	33,3	47,2	1,1
Южный борт . .	1,16	0,15	0,15	0,11	41,2	33,9	33,4	46,0	1,0

Кургаши́нкан

Поверхность . . .	1,14	0,38	0,34	—	39,0	—	29,6	40,0	2,4
Дно	1,03	0,21	0,21	—	45,0	—	30,3	45,1	0,5
Северный борт									
при H м:									
50 . . .	1,05	0,21	0,23	0,18	43,0	48,0	34,3	53,3	1,1
90 . . .	1,00	0,21	0,25	0,32	49,0	41,0	34,7	40,2	1,0
130 . . .	1,17	0,20	0,18	0,18	51,5	53,5	42,2	47,8	0,5
160 . . .	1,11	0,20	0,20	0,23	42,0	44,0	33,6	48,8	0,5

Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно отметить, что дневные условия летнего периода в среднем для карьеров юга характеризуются повышенным тепловым режимом на рабочих участках. Непосредственно определить влияние микрометеорологических параметров на тепловой режим рабочих мест очень сложно, так как значения радиационных характеристик — отраженной и рассеянной радиации, альbedo, а также температуры почвы и скорости ветра — меняются в зависимости от местоположения рабочих точек, характера горных пород (цвет, шероховатость), углов наклона уступа или борта карьера и др. Однако можно отметить, что при уменьшении скорости ветра в 2—3 раза температура черного шара на дне карьера увеличивается по сравнению с температурой на поверхности на 4—5°С, а по сравнению с оптимальной температурой тела человека (32—33°С) — на 13—15°С. Для рабочих

мест, расположенных у наиболее освещенных бортов, это увеличение может составить 20°C . Заметим, что разница температур воздуха ($\Delta t_{\text{в}}$) на площадках дно — поверхность и борт — поверхность значительно меньше разницы температур черного шара ($\Delta t_{\text{ш}}$) на соответствующих площадках (например, для Аксая

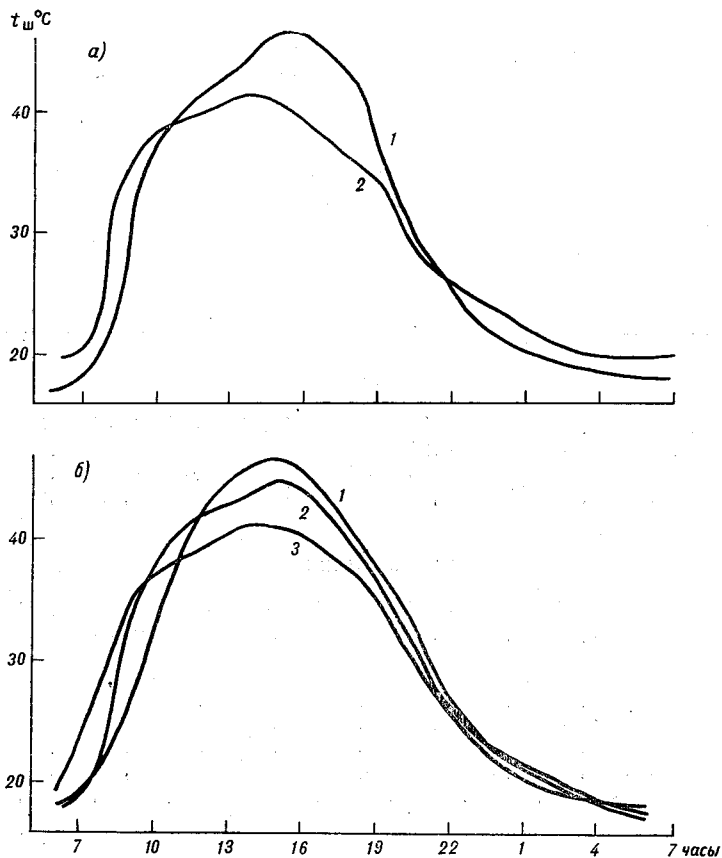


Рис. 1. Суточный ход температуры черного шара. Аксай
а — дно карьера (1) и поверхность (2); б — северный (1) и южный (2) борта карьера, поверхность (3)

$\Delta t_{\text{вд-п}} = 1,8^{\circ}\text{C}$, а $\Delta t_{\text{шд-п}} = 4,0^{\circ}\text{C}$, для Кургашинокана $\Delta t_{\text{вд-п}} = 0,7^{\circ}\text{C}$, а $\Delta t_{\text{шд-п}} = 5,1^{\circ}\text{C}$. Это дает основание сделать заключение о значимости радиационных факторов в южных карьерах и повышенном тепловом режиме рабочих мест, расположенных под открытым небом.

При изучении условий теплового режима рабочих мест, расположенных в кабинах оборудования, занятого в карьерах, наряду с метеорологическими факторами необходимо учитывать тепло-

выделения от двигателей и ограждающих покрытий, а также теплоизоляцию последних. Теплоизоляция кабины, обеспечивающая комфортный режим, должна определяться с учетом особенностей микроклимата рабочих участков карьера. Существующая теплоизоляция кабин горного оборудования не обеспечивает тепловой

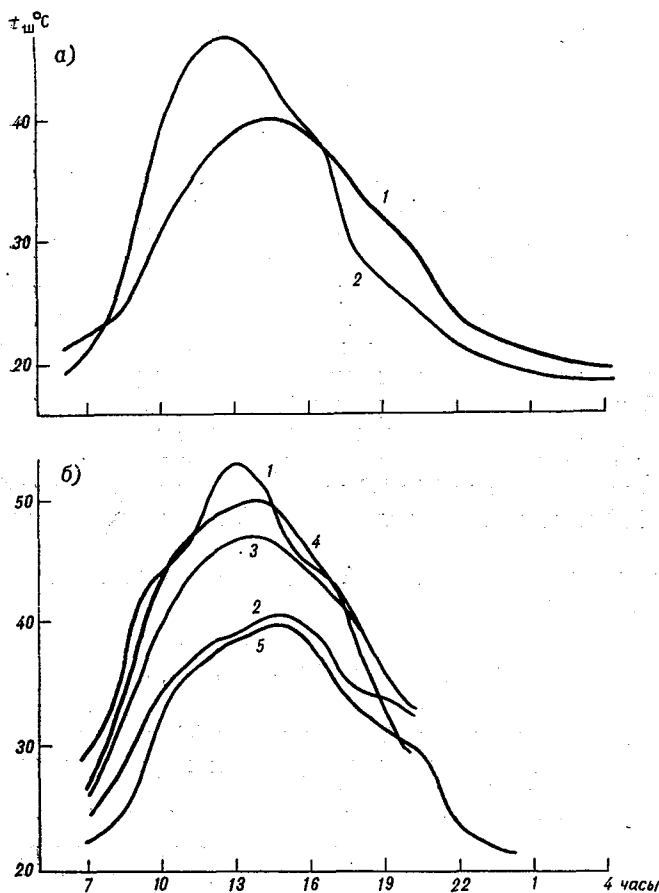


Рис. 2. Суточный ход температуры черного шара. Курга-шинкан.

a — поверхность (1) и дно карьера (2); b — северный борт карьера: 1 — глубина 50 м от дна карьера, 2 — 90 м, 3 — 130 м, 4 — 160 м, 5 — поверхность карьера.

комфорт на рабочих местах в карьерах, так как ее расчет ведется без учета параметров микроклимата рабочих мест.

Для выявления особенностей теплового режима рабочих мест рассмотрим суточный ход температуры черного шара ($t_{ш}$) для двух карьеров, представленный на рис. 1 и 2. Из рисунков видно, что максимальное значение $t_{ш.д}$ на 6–8°С превышает максимум

$t_{ш.п}$ и моменты наступления максимумов $t_{ш}$ в карьерах смещены. На открытой площадке максимум наступает в 14 час. и совпадает со временем максимального прихода S , на дне карьера максимум $t_{ш}$ смещается и в соответствии с моментами максимальных значений S , $t_{ш}$, $t_{в}$, $t_{б}$ и других метеорологических параметров приходится для Аксая на 15—16 час., для Кургашинокана — на 12—13 час. Различия в суточном ходе $t_{ш}$ в карьерах объясняется разной их глубиной и формой.

Превышение $t_{ш.д}$ над $t_{ш.п}$ в Аксае отмечается с 10 до 22 час. и указывает на тепловое воздействие слагающих карьер поверхностей в этот период на режим рабочих мест, расположенных в центре карьера. В Кургашиноканском карьере такое превышение отмечается с 8 до 16 час. Тепловое воздействие бортов и уступов на рабочие места, расположенные в центре карьера, в поздние послеполуденные часы прекращается, что обусловлено геометрией карьера, его глубиной, препятствующей попаданию солнечных лучей на дно карьера после 16 час. На рабочих местах, расположенных вблизи бортов (северного и южного), $t_{ш}$ выше, чем на открытой площадке на 5—6°С, и достигает максимума на северном борту в 15 час. Анализируя суточный ход $t_{ш}$ для точек, расположенных на различных глубинах на наиболее освещенном (северном) борту (рис. 2б), отметим, что максимум $t_{ш}$ на высоте 50 м от дна карьера достигает 53,8°С при скорости ветра днем 2 м/сек., на высоте 160 м от дна составляет 50,2°С при скорости ветра днем 1 м/сек.

Максимальное превышение $\Delta t = t_{ш.б} - t_{ш.п}$ для разных точек по глубине составит:

H_m	50	90	130	160
Δt °С . . .	13,3	1,0	8,0	10,0

Незначительная разность Δt на глубине 90 м показывает существенное влияние местоположения точки и характера подстилающей поверхности на тепловой режим.

На основании теории, разработанной Б. А. Айзенштатом [2], был произведен расчет температуры черного шара для разных точек карьера. Для расчетов использовалась формула температуры черного шара при условии, что известна температура черного шара при скорости ветра v_1 ($t_{шv_1}$):

$$t_{шv_2} = \frac{t_{шv_1} [kf(v_1) + \beta] - kt_{в} [f(v_1) - f(v_2)]}{kf(v_2) + \beta}, \quad (1)$$

где $f(v)$ — некоторая функция от скорости ветра ($f(v) = 1 + 0,9\sqrt{v} + 0,2\sqrt[3]{v}$); k — коэффициент, равный 0,0145; $\beta = 4\delta\sigma T^3$, для дневных температур летнего периода с достаточным приближением можно принять равным 0,01 кал/см²·мин·°С; $t_{в}$ — температура воздуха.

Значения функции $f(v)$ приведены в табл. 2 [2].

Данные расчета для разных точек карьера Аксай приведены в табл. 3.

Таблица 2
Значения функции $kf(v) + \beta$

	v м/сек			
	0	1	2	3
$f(v) \dots$	1,000	2,100	2,527	2,847
$kf(v) \dots$	0,0145	0,0304	0,0366	0,0413
$kf(v) + \beta \dots$	0,0245	0,0404	0,0466	0,0513

Таблица 3
Температура черного шара в разных точках карьера в зависимости от скорости ветра

Место наблюдения	v м/сек				
	0	1	2	3	5
1 серия					
Поверхность	46,8	40,9	40,0	39,4	38,0
Северный борт	56,6	46,2	44,5	43,2	42,0
Южный борт	56,0	45,1	43,3	42,1	41,0
$t_{ш. бс} - t_{ш. п} \dots$	9,8	5,3	4,5	3,8	4,0
$t_{ш. юю} - t_{ш. п} \dots$	9,2	4,2	3,3	2,7	3,0
2 серия					
Поверхность	50,0	43,0	41,7	41,2	40,5
Дно	58,5	48,0	46,5	45,5	44,0
Южный борт	59,5	48,1	46,3	45,5	43,9
$t_{ш. д} - t_{ш. п} \dots$	8,5	5,0	4,8	4,3	4,5
$t_{ш. юю} - t_{ш. п} \dots$	9,5	5,1	4,6	4,3	3,4

Результаты расчетов позволяют оценить влияние скорости ветра на тепловой режим рабочих мест. Можно отметить, что увеличение температуры черного шара за счет дополнительных источников радиации и теплового излучения слагающих карьер бортов и уступов составляет в среднем 10—12%.

Поскольку ветровые потоки в карьере по сравнению с открытой площадкой ослаблены (в среднем на 30—40%), увеличение тепловой нагрузки на рабочие места в летний период для дневных условий в южных карьерах может составить порядка 30%. Это прежде всего касается рабочих мест, расположенных под открытым небом (бурильщики, взрывники и др.).

В целом расчетный метод определения тепловых характеристик дает результаты, вполне сопоставимые с материалами производственных исследований. Наблюдающиеся отклонения можно

объяснить ограниченной точностью измерения отдельных величин и их непостоянством во времени.

На основании проведенных исследований можно заключить, что решающую роль в формировании повышенного теплового режима на рабочих участках в карьерах юга играют радиационные факторы и ослабленный ветровой режим.

Продолжительность периода с повышенным тепловым режимом колеблется в зависимости от глубины и формы карьера, углов закрытия горизонта для каждой площадки и микроклиматических особенностей местоположения рабочих точек (характера, состава и цвета горных пород, наклона бортов, скорости ветра).

Для средних условий летнего периода превышение тепловой нагрузки на рабочих участках, расположенных вблизи бортов, составляет 10—12% тепловой нагрузки на открытой площадке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оппл Д., Йокл М. Методика измерения микроклиматических условий в гигиенической практике. М., Медгиз, 1962.
2. Айзенштат Б. А. Методы расчета и результаты определений некоторых биоклиматических характеристик.— Труды САНИГМИ, 1965, вып. 22 (37).

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИНТЕГРАТОРА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАРЬЕРАХ

Проведенные в производственных условиях длительные исследования геотермического режима карьеров [1, 2] позволили выявить основные особенности теплового поля слагающих карьерное пространство элементов. По полученным результатам производственных измерений для более детального исследования теплового режима карьеров было проведено моделирование рассматриваемых процессов. За основу принят метод математического моделирования, реализуемый с помощью гидравлического интегратора, РС-цепей и аналоговых вычислительных машин.

С учетом большой протяженности горизонтальных площадок элементов карьерного пространства и малых горизонтальных градиентов температуры при отсутствии источников задача моделирования сводится к решению одномерного дифференциального уравнения температуропроводности

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(z) \frac{\partial t}{\partial z} \right], \quad (1)$$

где t — температура горных пород в момент τ на глубине z ; $\lambda(z)$ — коэффициент теплопроводности по оси z , c — удельная теплоемкость, ρ — плотность горных пород.

Если теплофизические характеристики не изменяются по глубине, то уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ — коэффициент температуропроводности исследуемого слоя почвы.

Аналитическое решение уравнения (1) или (2), особенно при сложных граничных условиях и изменении теплофизических свойств горных пород по глубине слоя, довольно затруднительно и требует выполнения большого объема счетной работы. Наличие у исследователя простейшего гидравлического интегратора позволяет

рассмотреть практически любое сочетание теплофизических характеристик исследуемого слоя почвы при заданных граничных условиях.

Соответствующим выбором масштабов осуществляется моделирование исследуемого цикла изменения метеорологических параметров, при этом, например, моделирование годового периода может быть осуществлено за несколько минут. Основное достоинство гидравлического интегратора — это наглядность получаемого решения в любой момент времени в любой точке исследуемого слоя грунта.

Первые работы по конструированию гидравлических интеграторов и разработке их теории выполнили советские ученые В. С. Лукьянов [3, 4], Д. В. Будрин [5], Б. И. Китаев [6], Г. П. Иванцов [7]. Полученные ими результаты нашли широкое применение в различных областях науки и техники.

Как известно, математическое моделирование тепловых явлений с помощью гидравлического интегратора основывается на аналогии процессов распространения теплового потока в твердом теле и течения вязкой жидкости в капиллярной трубке при ламинарном режиме. При этом исследуемый слой разбивается условно на N участков, каждый из которых моделируется элементом гидравлического сопротивления, а значения теплофизических коэффициентов принимаются для каждого участка постоянными. Аппроксимируя заданную функциональную зависимость их изменения $a_z = f(z)$ ломаной линией с числом ступеней, равным числу участков разбиения, можно приближенно моделировать любое изменение теплофизических характеристик по глубине исследуемого слоя. Меняя в процессе решения задачи величины гидравлических сопротивлений по определенному закону, можно учитывать также временное изменение теплофизических коэффициентов в суточном или годовом ходе.

Поэтому гидравлический интегратор (рис. 1) представляет собой цепочку последовательно соединенных гидравлических сопротивлений, в узлах которых подключаются индикаторные стеклянные трубки-пьезометры. Высота подъема жидкости в пьезометрах соответствует в некотором масштабе температуре соответствующего слоя почвы. Задание граничных условий в модели осуществляется с помощью сосудов A и B , связанных с гидравлической цепью в начале и конце. Уровни жидкости в этих сосудах соответствуют в определенном масштабе величинам температуры на границах исследуемого слоя. Обычно диаметр таких сосудов во много раз больше диаметра индикаторных трубок, что способствует поддержанию в них постоянного уровня жидкости при исследовании нестационарных процессов, а задание граничных условий при моделировании может быть автоматизировано путем перемещения сосуда граничных условий с заданным уровнем жидкости в нем по некоторому закону.

Для определения конструктивных параметров модели необходимо проанализировать уравнение масштабов. Если в элементах

гидравлических сопротивлений поддерживается ламинарный режим течения жидкости, то расход через любой участок цепи определяется разностью давлений и величиной его гидравлического сопротивления

$$q_{n,n+1} = \frac{P_n - P_{n+1}}{R_{n,n+1}} = \frac{\gamma}{R_{n,n+1}} (h_n - h_{n+1}), \quad (3)$$

где $q_{n,n+1}$ — расход жидкости в модели на участках n и $n+1$, P_n и P_{n+1} — давление гидравлической цепи соответственно в узлах

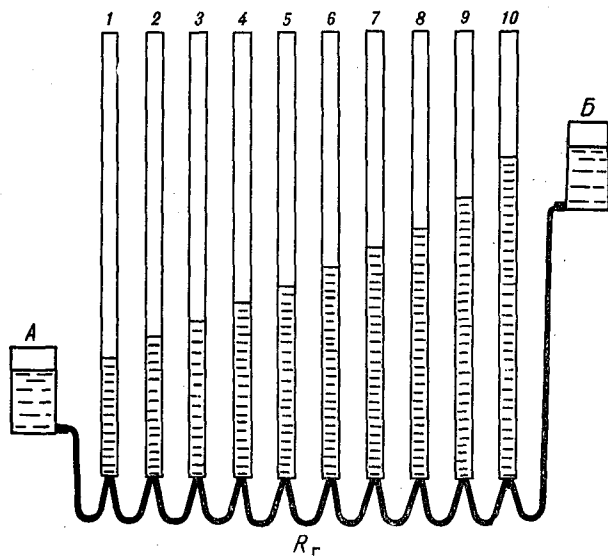


Рис. 1. Принципиальная схема гидравлического интегратора.

А и Б — сосуды для задания граничных условий, 1, 2, 3, ..., 10 — индикаторные трубки-пьезометры, R_r — гидравлические сопротивления.

n и $n+1$, h_n и h_{n+1} — высоты столбов жидкости в сосудах n и $n+1$, γ — удельный вес жидкости модели, R_n и R_{n+1} — величины гидравлического сопротивления.

Для любого сосуда модели изменение уровня жидкости в нем определяется разностью притока и стока. Для сосуда n приток жидкости за интервал времени $d\tau_m$ составит

$$Q_1 = \frac{\gamma}{R_{n-1,n}} (h_{n-1} - h_n) d\tau_m. \quad (4)$$

Величина стока определяется аналогичным уравнением

$$Q_2 = \frac{\gamma}{R_{n,n+1}} (h_n - h_{n+1}) d\tau_m. \quad (5)$$

Изменение уровня жидкости в трубке n составит за время $d\tau_m$

$$dh_n = \frac{Q_1 - Q_2}{S_n} = \left[\frac{\gamma (h_{n-1} - h_n)}{S_n R_{n-1, n}} - \frac{\gamma (h_n - h_{n+1})}{S_n R_{n, n+1}} \right] d\tau_m, \quad (6)$$

где S_n — площадь сечения пьезометра.

Принимая $R_{n-1, n} = R_{n, n+1} = R_r$, получим

$$\frac{dh_n}{d\tau_m} = \frac{\gamma}{S_n R_r} (h_{n-1} + h_{n+1} - 2h_n). \quad (7)$$

Представив вторую производную температуры по координате z в конечных разностях, запишем уравнение (2) в виде

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\rho \Delta z^2} (t_{n-1} + t_{n+1} - 2t_n), \quad (8)$$

где t_{n-1} , t_n , t_{n+1} — температура соответствующих слоев, Δz — величина отдельного слоя.

Сравнивая уравнения (7) и (8), видим, что они эквивалентны. Температура n -го слоя моделируется в приборе величиной уровня жидкости соответствующей пьезометрической трубки, а теплофизические свойства горных пород — гидравлическим сопротивлением и величиной сечения пьезометров. При этом тепловому сопротивлению слоя почвы соответствует в некотором масштабе гидравлическое сопротивление данного участка модели, а величина теплоемкости горных пород слоя моделируется величиной площади сечения индикаторной трубки.

Введем масштабы

$$\left. \begin{aligned} M_t &= \frac{t}{h}; & M_c &= \frac{c\rho}{S}; \\ M_\tau &= \frac{\tau}{\tau_m}; & M_R &= \frac{R_r}{R_r} = \frac{\gamma \Delta z^2}{\lambda R_r}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя значения (9) в уравнение (8) и сравнивая с (7), получим

$$\frac{M_\tau}{M_R M_c} = 1. \quad (10)$$

Это уравнение связи масштабов модели позволяет по конструктивным параметрам определять масштаб времени моделирования или, задаваясь последним, выбирать требуемые значения элементов интегратора. В уравнение (10) не входит масштаб температур. Это позволяет в приборе моделировать тепловые процессы, задаваясь любым значением M_t .

В развернутом виде уравнение (10) принимает вид

$$\frac{\tau \lambda R_r S N^2}{\tau_m H^2 \gamma c \rho} = 1. \quad (11)$$

где H — величина исследуемого слоя почвы; N — число участков модели.

При равномерном ламинарном течении жидкости в капиллярных трубках гидравлических сопротивлений модели потери давления на трение определяются формулой [8]

$$\Delta P = \frac{32\mu lv}{d^2}, \quad (12)$$

где ΔP — потери давления на участке длиной l , d — диаметр трубки, v — средняя скорость течения, μ — динамический коэффициент вязкости жидкости.

Перепад высот жидкости в двух смежных пьезометрах

$$\Delta h = \frac{32\mu lv}{\gamma d^2} = \frac{32\nu lv}{gd^2}, \quad (13)$$

где g — ускорение свободного падения, $\nu = \frac{\mu g}{\gamma}$ — коэффициент кинематической вязкости.

Расход жидкости через трубку

$$q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi g d^4}{128\nu l} \Delta h = \frac{\gamma \Delta h}{R_r}. \quad (14)$$

Из уравнения (14) получаем расчетную формулу для определения величины гидравлического сопротивления капиллярной трубки длиной l и с внутренним диаметром d :

$$R_r = \frac{128\nu l \gamma}{\pi g d^4}. \quad (15)$$

При моделировании на гидравлическом интеграторе необходимо учитывать изменение R_r трубок при колебаниях температуры. Наиболее часто в качестве рабочей жидкости прибора применяется вода, кинематическая вязкость которой существенным образом зависит от температуры [9]:

Температура воды, °С	15	16	17	18	19	20	20,4
Кинематическая вязкость, $\nu \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$	11,46	11,17	10,89	10,62	10,35	10,10	10,00

Поэтому при моделировании необходимо осуществлять постоянный контроль температуры рабочей жидкости, вводя соответствующие поправки в расчет R_r .

Для моделирования одномерного уравнения температуропроводности при геотермических исследованиях в карьерах был изготовлен по схеме на рис. 1 гидравлический интегратор. Конструктивно он выполнен в виде двух взаимно перпендикулярных площадок из листового винипласта, закрепленных на уголовом каркасе. Горизонтальная площадка служит основанием прибора. На ней расположены гидравлические сопротивления. На вертикальной плоскости размещены индикаторные трубки-пьезометры длиной 1 м в количестве 10 штук. При моделировании применялись стеклянные трубки с внутренним диаметром 5, 12 и 20 мм.

В качестве элементов гидравлических сопротивлений использованы тонкие резиновые трубки диаметром 1,0—1,2 мм. Величина их гидравлического сопротивления регулировалась с помощью системы штоков, путем изменения длины капиллярных трубок. Соединения пьезометров и элементов сопротивлений осуществлялось с помощью стеклянных тройников и коротких отрезков резинового шланга с внутренним диаметром 8 мм. Весь монтаж пьезометров и сопротивлений выполнен на винипластовых основаниях с применением металлических хомутиков, жестко закрепленных под винты.

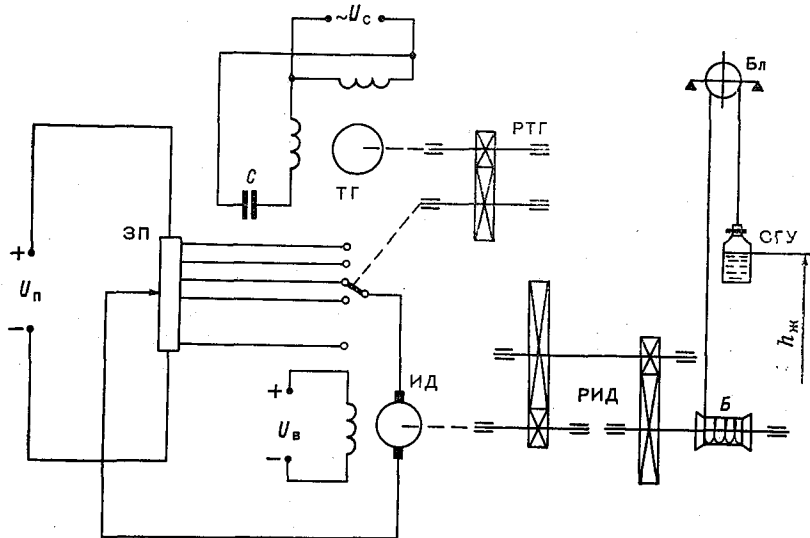


Рис. 2. Принципиальная схема функционального преобразователя для автоматического задания граничных условий на модели.

ЗП — задающий потенциометр, ТГ — тактовый генератор, РТГ — редуктор двигателя тактового генератора, ИД — исполнительный двигатель, РИД — редуктор исполнительного двигателя, Бл — неподвижный блок, СГУ — сосуд для задания граничных условий

По торцевым сторонам вертикальной плоскости модели закреплены полихлорвиниловые трубы, на которых укреплены сосуды для задания граничных условий A и B . При этом сосуд A с помощью электромеханической системы через блок от исполнительного двигателя перемещался автоматически в соответствии с заданной программой. Принципиальная схема задания граничных условий приведена на рис. 2. Период моделируемой функции задания граничных условий $h_{ж} = f(\tau)$ разбивался на 24 участка, каждый из которых моделировался равномерным перемещением сосуда задания граничных условий при подаче на исполнительный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением напряжения определенной величины и полярности. С помощью редуктора исполнительного двигателя выбиралась величина требуемого перемещения $h_{ж}$ в пределах модели. Величина и полярность напряжения исполнительного двигателя для каждого участка моделируемой

функции снимались с задающего потенциометра и с помощью тактового генератора подавались на исполнительный двигатель. Тактовый генератор представлял собой синхронный маломощный электродвигатель типа СД-2, который через редуктор (РТГ) приводил

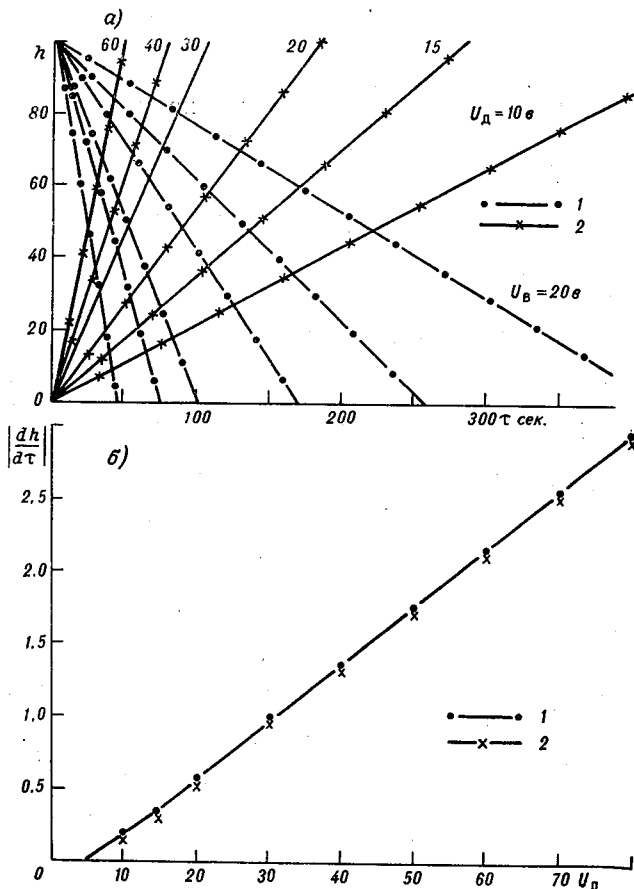


Рис. 3. Результаты тарировки задающего функционального преобразователя.

a — семейство характеристик $h_{ж} = f(\tau)$ при напряжении ИД U_d ,
 b — зависимость скорости подъема (спуска) от напряжения на исполнительном двигателе; 1 — спуск, 2 — подъем.

во вращение клеммный язычок переключателя, у которого по окружности равномерно расположено 24 ламели. С помощью редуктора тактового генератора устанавливался период моделируемой функции задания граничных условий.

Предварительной тарировкой электромеханического функционального преобразователя снималось семейство характеристик зависимости высоты подъема или спуска сосуда задания граничных условий от времени работы исполнительного двигателя (рис. 3 а),

затем вычислялась скорость подъема в функции напряжения двигателя (рис. 3 б). Для реализации требуемой кривой $h_{ж}=f(\tau)$ для каждого из 24 ее участков вычислялась скорость подъема или спуска, затем по характеристике (рис. 3 б) определялась величина и знак напряжения на исполнительном двигателе при напряжении возбуждения $U_{в}=\text{const}$, которые снимались с задающего потенциометра (ЗП) относительно его средней точки и подавались на клеммы тактового генератора. Задающий потенциометр представлял собой натянутую между изоляторами на пластмассовом каркасе нихромовую спираль, питаемую постоянным напряжением $U_{п}$. При наборе задачи величина напряжения и знак определялись относительно средней точки с помощью лампового вольтметра ВК-7Б. Как показали контрольные испытания преобразователя, при тщательной настройке всех узлов величина погрешности аппроксимации синусоидальной зависимости не превышала 1,5%.

Для подготовки модели к решению требуемой задачи задавались глубины исследуемого слоя (H), теплофизические характеристики (λ , c , ρ), граничные $[t=f(\tau)|_{z=0}$ и $t=f(\tau)|_{z=H}]$ и начальные условия $[t=f(z)|_{\tau=0}]$. По значениям λ , c , ρ и принятой величине S трубок-пьезометров с учетом $N=10$ рассчитывалась величина $R_{г}$ отдельного элемента модели. Контрольная тарировка и окончательная настройка значений $R_{г}$ каждого элемента осуществлялась непосредственно на модели путем измерения расхода через данный элемент и определения перепада высот столбов жидкости в пьезометрах данного участка. Как показали расчеты, значения числа Рейнольдса не превышали 450, т. е. моделирование проводилось в области ламинарного режима течения жидкости. По результатам геотермических исследований [1, 2], на глубине $z=H$ температурные колебания отсутствуют. Для суточного хода $H=0,8\div 1,5$ м, для годового $H=15\div 25$ м. Поэтому в модели граничное условие $t=f(\tau)$ задавалось путем жесткой установки сосуда граничных условий на требуемой высоте, где $t_{н}=M_{г}\cdot h_{ж}^n$. Граничное условие на поверхности почвы ($z=0$) задавалось в форме некоторого временного изменения температуры $t=f(\tau)$ суточного или годового периода. На модели это реализовалось автоматически с помощью функционального электромеханического преобразователя.

Регистрация результатов моделирования осуществлялась путем фотографирования всей модели через равные интервалы времени. Обработанная фотопленка затем проектировалась на экран с помощью диапроектора ЛЭТИ-60. При этом отсчет результатов моделирования сводился к замеру на экране столба жидкости в каждой трубке.

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты моделирования годового хода температуры в 20-метровом слое почвы ($H=20$ м). Коэффициент температуропроводности принят постоян-

ным, $a=10^{-6}$ м²/сек. Температура поверхности почвы в годовом цикле изменяется по синусоидальному закону

$$\Theta_{z=0} = \Theta_0 + A_0 \sin \frac{2\pi}{T} \tau, \quad (16)$$

где Θ — значение температуры поверхности почвы в годовом ходе в относительных величинах, Θ_0 — начальное значение температуры при $z=0$, A_0 — амплитуда годовой температурной волны, $T=3,16 \cdot 10^7$ сек. — период годовой волны.

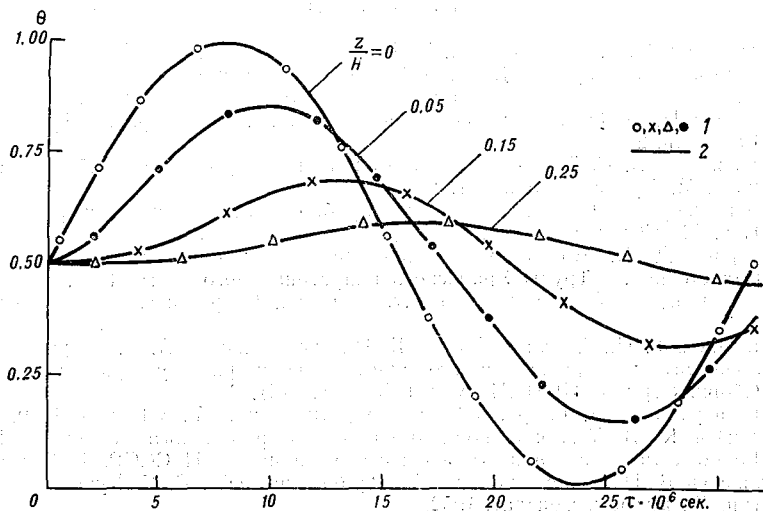


Рис. 4. Результаты моделирования годового изменения температуры почвы (1) и аналитического расчета (2).

На глубине $z=H$ значение температуры $\Theta_H=0,5$. Величина амплитуды $A_0=0,5$. Начальное распределение температуры по глубине принято изотермическим, т. е. $\Theta(z)|_{\tau=0}=0,5$.

Для сравнения результатов моделирования на рис. 4 для нескольких глубин приведены кривые, вычисленные по известному решению уравнения теплопроводности при рассматриваемых граничных условиях [10]

$$\Theta_{(z, \tau)} = \Theta_{(z, 0)} + A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{T}{a\pi}} \right) \right]. \quad (17)$$

Как видно из рис. 4, результаты моделирования полностью совпадают с расчетными кривыми, что говорит о больших возможностях при использовании гидравлического интегратора для моделирования теплового режима почвы.

Простота технической реализации модели, настройки и подготовки исходных данных для моделирования не требует высокого

уровня технического персонала для обслуживания прибора. Большая оперативность и возможность просмотреть различные варианты изменения как теплофизических свойств исследуемого слоя, так и его граничных и нулевых условий делает гидравлический интегратор незаменимым при исследованиях геотермического режима в карьерах, значительно сокращая при этом объем счетно-вычислительных работ, обеспечивая высокую точность решения и делая наглядным получаемое решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Битколов Н. З., Иванов И. И. Результаты исследований геотермического режима в карьерах. — В кн.: «Разработка месторождений полезных ископаемых в условиях высокогорья и жаркого климата». Ташкент, 1969.
2. Иванов И. И. О геотермических исследованиях в карьерах. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
3. Лукьянов В. С. Технические расчеты на гидравлических приборах Лукьянова, М., Трансжелдориздат, 1937.
4. Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов. — Изв. АН СССР, 1939, № 2.
5. Будрин Д. В. Моделирование нестационарных тепловых потоков в печных стенках. — Труды Уральского индустриального ин-та, 1941, вып. XVII.
6. Китаев Б. И. Теплообмен в шахтных печах: Свердловск, Metallurgizdat, 1948.
7. Иванцов Г. П., Афанасьева К. И., Романова А. В. Теория гидравлического интегратора и его применение к расчету кристаллизации. — Сборник трудов ЦНИИЧермет, 1953, вып. 2(5).
8. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М., «Недра», 1970.
9. Кочнев К. В. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха. — Труды Горно-геологического ин-та Уральского филиала АН СССР, 1960, вып. 44.
10. Алисов Б. П., Дроздов О. А., Рубинштейн Е. С. Курс климатологии. Л., Гидрометеониздат, 1952.

И. И. ИВАНОВ

К ВОПРОСУ О МЕТОДИКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАРЬЕРАХ

Одним из основных элементов, формирующих термический режим в карьере, является почва [1, 2], т. е. поверхностный слой горных пород, слагающих уступы, бермы, съезды, траншеи и т. п. За счет поступающей солнечной радиации горные породы увеличивают свое теплосодержание, являясь своеобразными аккумуляторами тепловой энергии, температура их при этом повышается. При отсутствии поступления солнечной энергии за счет радиационного выхолаживания почвенных слоев температура их снижается.

Температурные колебания происходят не только на поверхности почвы, но и распространяются довольно значительно по глубине. Величина гелиозоны [3] зависит от количества поступающей солнечной энергии, теплофизических свойств горных пород и составляет для разных районов 15—30 м. Суточные колебания температуры распространяются в почве в пределах 0,8—1,5 м.

Своеобразие карьера как геометрического места в пространстве определяет дифференцированное количество поступающей солнечной энергии к различным бортам и участкам карьерного пространства [4]. Поэтому борта карьера нагреваются по-разному: наибольшее количество поступающей радиации воспринимает северный борт, южный борт находится в условиях постоянного дефицита тепловой энергии. Восточный и западный борта карьера занимают промежуточное положение.

С увеличением глубины карьера отмечается существенное снижение скорости воздушных потоков, вызываемых динамическим фактором [5], и начинает заметно проявляться влияние геотермической ступени [6].

Для выявления особенностей теплового поля в пределах карьерного пространства и изучения динамики его с целью выбора наиболее рациональных путей нормализации санитарно-гигиенических условий труда и разработки надежных методов прогноза параметров микроклимата в глубоких карьерах были проведены

специальные геотермические исследования [7, 8]. Эксперименты включали: определение температуры горных пород в наиболее характерных точках карьерного пространства (поверхность и дно карьера, борта различной ориентации, промежуточные уступы и т. п.), выявление особенностей распределения геотерм (изменения температуры по глубине), исследования тепловых характеристик почвы, а также выявление корреляционных связей с другими метеорологическими факторами (температура и влажность, скорость и направление воздушных потоков, элементы солнечной радиации и составляющие теплового баланса).

Измерения температуры горных пород производились в предварительно пробуренных скважинах. Диаметр их составлял 100—150 мм, глубина скважины принималась в зависимости от целевого назначения. Для исследования особенностей суточного хода температуры она составляла 0,8—1,5 м. При исследовании длительных циклов, например годового периода, пробуривались скважины на глубину 15—25 м.

Тепловое поле в зоне скважины в процессе бурения претерпевает существенные изменения [9], для восстановления его требуется довольно длительный промежуток времени. Период «выстаивания» зависит от глубины скважины, теплофизических характеристик горных пород, а также от технологических особенностей процесса (длительность бурения, применение промывочной жидкости, режущий инструмент и т. п.) и составляет практически отрезок времени от нескольких суток до недель.

Непосредственно перед измерениями проводился контроль восстановления теплового поля скважины — снимались отсчеты показаний приборов через интервал времени $\Delta\tau=2$ часа. Возможные расхождения показаний любого из датчиков при этом должны находиться в пределах погрешности измерения.

Для исследования поверхностного слоя почвы (0—0,4 м) применялись траншеи [10], глубиной 0,4 м с размерами по поверхности $0,2 \times 1,2$ м. Датчики в траншеях размещались горизонтально на соответствующем уровне (глубина заложения термометра контролировалась по линейке, так как при малых значениях глубины погрешность установки датчика дает большие ошибки при последующих расчетах и анализе полученных материалов).

В качестве чувствительных элементов измерительного комплекса принципиально могут быть применены любые термометры. Однако специфические условия технологического процесса в карьере (применение мощной современной техники при бурении, на погрузке и транспортировке горной массы; постоянные, ежедневные массовые взрывы; повышенная запыленность и загазованность и т. п.) приводят к тому, что применение для поверхностного слоя почвы, например, вытяжных стеклянных термометров Савинова нельзя признать целесообразным ввиду их малой надежности и сохранности при механических воздействиях.

Для измерения температуры в скважинах могут быть применены максимальные или минимальные термометры, перемещаемые

по глубине. Однако из-за весьма значительных ошибок измерения температуры пород вследствие конвективного теплообмена по всей глубине скважины, из-за ненадежности теплового контакта термометра со стенками скважины, а также из-за низкой механической прочности такой метод измерения при геометрических исследованиях не применяется. Наиболее перспективными являются малогабаритные термодатчики (термопары, терморезисторы, полупроводниковые диоды и триоды, металлические термометры сопротивления), вполне надежные в работе и стабильные во времени при длительной эксплуатации.

Широкое применение для измерения температуры почвы нашли термопары [11, 12, 13], однако необходимость стабилизации температуры «холодного» спая и малая ЭДС одного элемента (что требует в связи с этим иметь либо высокочувствительные гальванометры, либо большие батареи таких термопар) создают ряд дополнительных трудностей при измерениях.

Терморезисторы как датчики температуры [14, 15], несмотря на целый ряд весьма весомых достоинств (ничтожно малые габариты, высокий температурный коэффициент сопротивления, большое значение номинального сопротивления, незначительная тепловая инерция и т. п.), имеют ряд существенных недостатков (большой разброс и изменение во времени параметров, нелинейность температурной характеристики). Полупроводниковые диоды и триоды как датчики температуры [16, 17] имеют аналогичные недостатки. Поэтому предпочтение следует отдать металлическим термометрам сопротивления, которые изготавливаются из тонкой нити со сравнительно высоким удельным сопротивлением и значительным температурным коэффициентом сопротивления (платина, медь, никель, вольфрам). Уступая терморезисторам по величине температурного коэффициента сопротивления, термометры сопротивления обладают линейными температурными характеристиками, хорошей воспроизводимостью при массовых измерениях, высокой стабильностью во времени, достаточной механической прочностью.

Для экспериментальных исследований теплового режима горных пород в карьерах можно признать удачной установку для дистанционного измерения температуры почвы М-54 с набором медных термометров сопротивления [18], имеющих номинальное значение сопротивления $R_0 = 235$ ом.

Данный прибор выпускался серийно нашей промышленностью, однако конструктивно он предназначен для измерения температуры пород до глубины $z_{\max} = 3,2$ м. При незначительной переделке коммутации датчиков и соответствующей тарировке установка М-54 позволяет производить дистанционно измерения температуры горных пород практически на любой глубине и в любой точке карьерного пространства. Суммарная погрешность измерения температуры составляет не более $\pm 0,1^\circ \text{C}$.

Производственные геотермические исследования в условиях карьеров проводились как в стационарных условиях, когда датчики размещались по скважинам на длительный промежуток

времени, так и в экспедиционных условиях. При этом применялись несколько отличные друг от друга методы установки датчиков по глубине.

В стационарных условиях, когда измерения проводились практически в течение года, установка датчиков температуры по глубине скважины осуществлялась с помощью пластмассовых труб диаметром 20 мм, собираемых из отдельных отрезков длиной по 1 м в единый несущий элемент всей гирлянды. Тампонаж скважины осуществлялся с помощью мелко измельченной породы, извлекаемой при бурении скважин. На трубе (с выбранным шагом по глубине) концентрично располагались полые металлические стаканы, положение которых на трубе фиксировалось с помощью металлических шпилек. Дно и верхняя крышка каждого стакана имели ряд отверстий для коммутационных кабелей ниже расположенных датчиков. Диаметр стакана был несколько меньше диаметра скважины, что обеспечивало возможность надежного перемещения и установки всей системы на требуемую глубину.

После установки на несущем элементе в заданном порядке всех стаканов производилось размещение в них чувствительных элементов. Внутренний объем стаканов заполнялся мелко измельченной породой, что обеспечивало хороший тепловой контакт датчика и стакана с породой. Соединительные кабели дополнительно крепились к трубе с помощью изоляционной ленты. Пространство между стаканами также заполнялось мелко измельченной породой, что способствовало снижению конвективного теплообмена по глубине скважины, а стаканы, плотно прилегая к стенкам скважины, давали надежный тепловой контакт датчика и горных пород в точке измерения.

В экспедиционных условиях в качестве несущего элемента использовался капроновый шнур. Требуемая глубина размещения датчиков устанавливалась при наладке на поверхности скважины и контролировалась перед установкой с помощью рулетки соответствующей длины. Тампонаж скважин осуществлялся с помощью пневматической системы, которая представляла собой совокупность надуваемых резиновых баллонов, объединенных общей магистралью. Нагнетание воздуха производилось с поверхности, с помощью ручного насоса. При этом датчики размещались на боковой поверхности баллонов. При нагнетании воздуха в магистраль баллоны закрывали скважину и плотно прижимали датчики к ее стенкам. Устье скважины до первого баллона, как и в стационарных условиях заложения датчиков, заполнялось мелко измельченной породой.

В поверхностном слое почвы после установки датчиков траншея заполнялась породой. Провода от датчиков длиной не менее 0,5 м укладывались на уровне своего датчика также в траншеи, что уменьшало погрешность измерения за счет непосредственного нагрева коммутационных кабелей.

Температура и влажность воздуха в стационарных условиях определялись по данным термометров, расположенных в психро-

метрической будке. В экспедиционных условиях значения температуры и влажности определялись с помощью аспирационного психрометра Асмана.

Отсчет показаний приборов производился в срочные часы (1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 и 22 часа местного времени). Для выявления особенностей суточного хода, особенно в поверхностном слое, частота отсчетов увеличивалась. Для больших глубин ($z \geq 0,8$ м) частота отсчетов может быть уменьшена до 2—4 раз в сутки.

Результаты показаний приборов заносились в рабочие журналы, затем обрабатывались с учетом поправок и оперативно, выборочно строились кривые суточного хода и геотермы горных пород.

Результаты измерений по обработанным данным записей в журналах и построенным графикам подвергались критическому рассмотрению, что позволило выявить плавность хода изменения характеристик температурного поля в исследуемых точках. При наличии «выпадающих» точек такие измерения браковались, а чувствительный элемент заменялся на исправный. Периодически, 1—2 раза в год, весь измерительный комплекс подвергался контрольной тарировке, при этом характер изменения поправок каждого чувствительного элемента при испытаниях свидетельствовал о пригодности данного элемента для проведения дальнейших геотермических исследований.

Проведение комплексных измерений теплового режима почвы за длительный промежуток времени позволило выявить наиболее характерные особенности теплового поля карьера. Исходя из периодичности годовой изменчивости основных климатологических факторов, наиболее целесообразно проводить замкнутый цикл измерений годовой протяженности. Это дает возможность выявить устойчивые корреляционные связи между метеорологическими параметрами, необходимые для разработки аналитических методов расчета теплового режима и составления надежных и достоверных прогнозов параметров микроклимата, что имеет особенно большое значение для планируемых глубоких карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фатуев Н. Г. Новые данные о естественном проветривании глубоких карьеров. — Сборник научн. трудов НИИОГР, 1964, вып. III.
2. Фатуев Н. Г. и др. Тепловой фактор в карьерах. — Сборник научн. трудов НИИОГР, 1965, вып. IV.
3. Суетнов В. В. Результаты экспериментальных исследований гелиотермозоны в Дагестане. — Труды Ин-та геологии (Махачкала), 1968, вып. 7.
4. Битколов Н. З., Егоров Е. М., Тюнякина Н. С. Некоторые особенности радиационного и термического режима карьеров. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
5. Битколов Н. З. и др. Характер изменения скорости ветра в карьерах. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
6. Никитин В. С. Проблемы проветривания глубоких карьеров. — В кн.: «Глубокие карьеры». Изд. «Наукова думка», Киев, 1970.

7. Битколов Н. З., Иванов И. И. Результаты исследований геотермического режима в карьерах. — В кн.: «Разработка месторождений полезных ископаемых в условиях высокогорья и жаркого климата». Ташкент, 1969.
8. Иванов И. И. О геотермических исследованиях в карьерах. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
9. Кутасов И. М. Восстановление температурного поля пород после бурения скважин. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1964, № 5.
10. Настройка гидрометеорологических станциям и постам. Л., Гидрометеоздат, 1969.
11. Чудновский А. Ф. Физика теплообмена в почву. М.-Л., Гостехиздат, 1948.
12. Каганов М. А., Чудновский А. Ф. Приборы для измерения температуры поверхности почвы. — Сб. трудов по агрономической физике, 1952, вып. 5.
13. Дубровин Л. В. Прибор для измерения градиентов температуры в верхнем слое почвы. — Сб. работ Куйбышевской ГМО, 1967, вып. 4.
14. Нечаев Г. К. Полупроводниковые термосопротивления в автоматике. Киев, Гостехиздат УССР, 1962.
15. Удалов Н. П. Полупроводниковые датчики. М.-Л., «Энергия», 1965.
16. Фогельсон И. Б. Транзисторный диод как термочувствительный датчик. — Сб. трудов по агрономической физике, 1966, вып. 13.
17. Турченков В. И. Датчик температуры на транзисторах. — «Приборы и системы управления», 1967, № 7.
18. Беспалов Д. П. Дистанционная установка для измерения температуры почвы. — Труды ГГО, 1960, вып. 103.

С. И. ЗЕНОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАССЕЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ КАРЬЕРОВ

Процессы рассеяния и распространения примесей в атмосфере карьеров под действием энергии ветра изучались В. С. Никитиным с использованием аналитических методов и физических моделей [1, 2]. Изучение аналогичных процессов в штилевую погоду имеет еще большее практическое значение с позиций санитарно-гигиенической обстановки и существенным образом зависит как от характера источника, так и от стратификации атмосферы. Изучение таких процессов на физических моделях возможно и осуществлялось применительно к изотермическим и заведомо устойчивым стратификациям [3]. Вместе с тем накопление и распространение примесей во многом зависят от характера устойчивости, который в ряде случаев не может быть смоделирован на физической модели.

В метеорологии, в теории распространения вредных примесей в атмосфере, основным элементом, определяющим распространение примеси, принят коэффициент турбулентной диффузии, являющийся функцией многих параметров, включая градиент температуры, скорость ветра, шероховатость поверхности и т. д.

Установлено [4], что при скоростях ветра, близких к нулю, распространение и накопление примесей в атмосфере почти полностью определяется градиентом температуры. Иначе говоря, распределение коэффициента турбулентной диффузии по высоте полностью определяется распределением градиента температуры. Это обстоятельство оказывается очень важным для возможностей моделирования сложных инверсий, т. е. позволяет отойти от необходимости учета ветровых потоков и значительно облегчает задачу моделирования.

Коэффициент турбулентной диффузии входит в основное уравнение диффузии вида

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -k_x \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + Q(t), \quad (1)$$

где c — концентрация примеси, k_t — коэффициент турбулентной диффузии, x, y, z — координаты направления процесса, $Q(t)$ — интенсивность источника.

Реализация уравнения (1) проводится, как правило, на ЭЦВМ, однако для получения качественной картины и удобства оперативного анализа результатов наиболее приемлемо использовать аналоговые вычислительные машины (АВМ).

Рассмотрим возможность использования АВМ для моделирования процессов накопления и разбавления вредных примесей в атмосфере карьера, показанного на рис. 1.

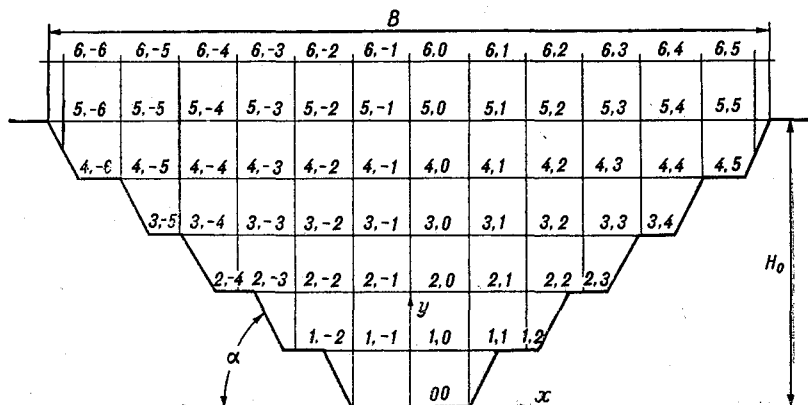


Рис. 1. Профиль и сетка разбиения карьера.

Будем считать, что:

- 1) источник вредностей расположен в нижней части карьера;
- 2) выделение вредностей (интенсивность источника) постоянно во времени $Q(t) = \text{const}$;
- 3) состояние атмосферы карьера а) неустойчивое, б) безразличное, в) устойчивое (общекарьерная инверсия).

Профили коэффициента турбулентной диффузии (рис. 2), принятые к рассмотрению, близки к профилям, которые были получены в реальных условиях.

Примем следующие допущения:

1. Будем считать структуру атмосферы однородной, находящейся в соответствии с принятым решением изменения k_t .
2. На первом этапе будем считать $k_t = \text{const}$ по линии горизонта.
3. Концентрация примеси за пределами карьера на уровне (6,0) равна 0.

Сформулируем начальные и граничные условия.

Начальные условия:

$$\text{При } t = 0 \quad \left. \begin{array}{l} c_j = 0, \\ c_{00} = c_{\text{ист.}} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Граничные условия:

$$c_{60} = 0, \quad c_{j, i-1} = c_{j, i} = c_{j, i+1}. \quad (3)$$

Первоначально будем полагать, что процесс происходит по линии $(j, 0)$, т. е. примем исходным одномерный случай. Тогда уравнение (1) будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -k_{\tau y} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + Q(t). \quad (4)$$

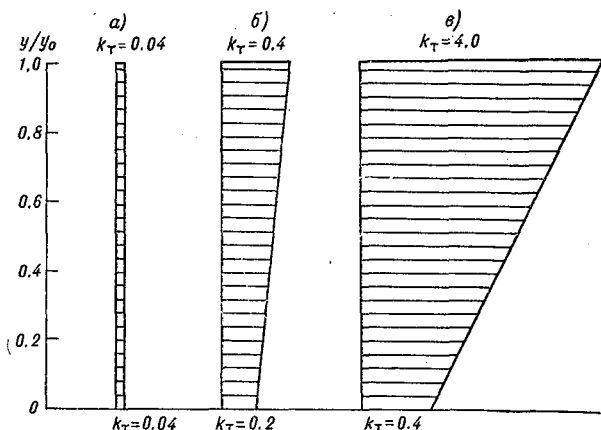


Рис. 2. Профили коэффициента турбулентной диффузии:

а — устойчивое состояние атмосферы (обшекарьерная инверсия),
б — безразличное, *в* — неустойчивое.

Замена частных производных полными производится с помощью конечных разностей. Применяя центральную разность вида

$$\frac{\partial^2 c_j}{\partial y^2} = \frac{1}{(\Delta y)^2} (c_{j-1} - 2c_j + c_{j+1}), \quad (5)$$

получаем вид исходного уравнения в полных производных

$$\frac{dc_j}{dt} = -\frac{k_{\tau y}}{(\Delta y)^2} (c_{j-1} - 2c_j + c_{j+1}) + Q(t), \quad (6)$$

где c_{j-1} , c_j , c_{j+1} — концентрации примеси в $(j-1)$, (j) , $(j+1)$ -й точках пространства соответственно, Δy — величина разбиения по направлению.

Приняв $\Delta y = 0,2 H_0$, получаем систему из пяти уравнений вида (6), которая может быть реализована на АВМ типа МН-7.

Приняв источник равномерно распределенным и определив его интенсивность, приходящуюся на единицу площади подошвы карьера, получим значение концентрации примеси на границе

$$c_{\text{ист}} = \frac{q(t) \Delta y}{k_{\tau 0,0}} + c_{1,0}, \quad (7)$$

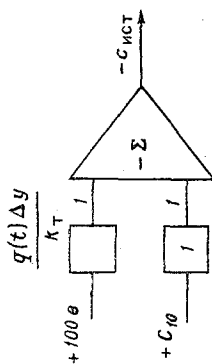
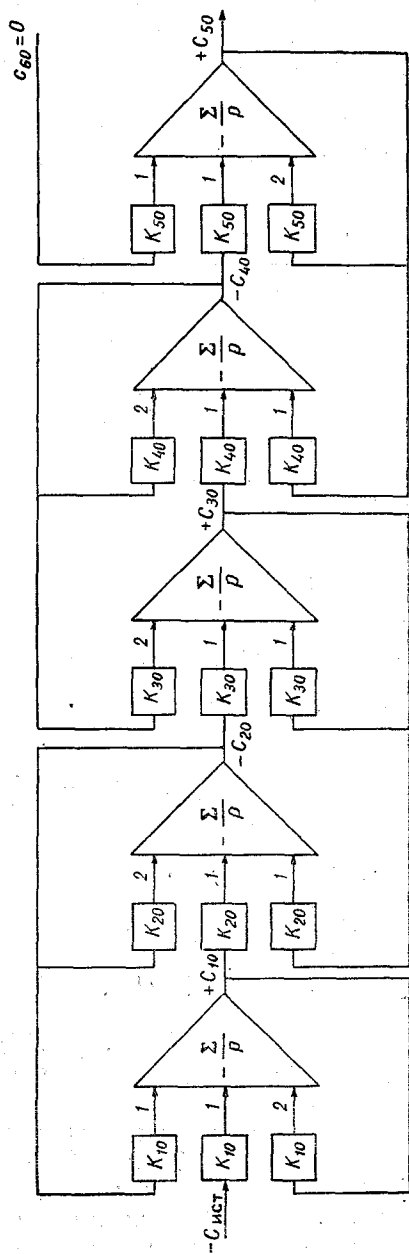


рис. 3. Блок-схема решения задачи.

где $c_{\text{ист}}$ — концентрация примеси на границе, в точке 0,0 (мг/м³), $q(t) = \text{const}$ — интенсивность источника вредностей, приходящаяся на единицу площади подошвы карьера (мг/час·м²), Δy — величина разбиения (м), $k_{T\ 0,0}$ — коэффициент турбулентной диффузии в точке (0,0 м²/час), $c_{1,0}$ — концентрация примеси в точке 1,0 (мг/м³).

Приведение к машинному виду уравнений производится путем введения масштаба времени m_t , выбор которого полностью определяется величинами Δy и $k_{T\ 0,0}$. Кроме того, необходимо учитывать

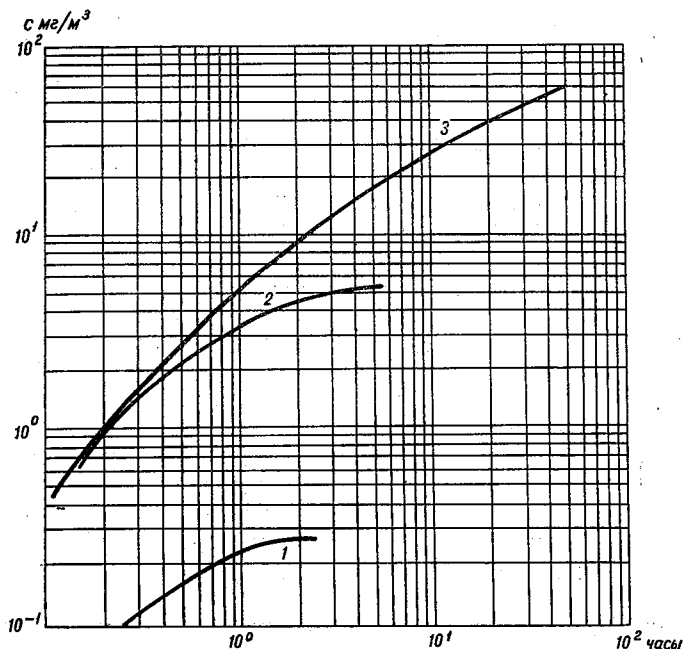


Рис. 4. Изменение концентрации примеси в слое 1,0
1 — неустойчивое состояние атмосферы карьера; 2 — безразличное; 3 — устойчивое.

расширение зоны перемешивания вводом отношения площадей в j -том и $(j-1)$ -м слоях (S_j и S_{j-1}).

Таким образом, общий коэффициент перед скобкой в уравнении (6) будет иметь вид:

$$k = \frac{k_{Ty} m_t S_j}{(\Delta y)^2 S_{j-1}}. \quad (8)$$

Блок-схема решения задачи представлена на рис. 3.

На рис. 4 показаны кривые накопления примеси в прилежащем к подошве слоя при принятых распределениях коэффициента турбулентной диффузии k_{Ty} . Из приведенного графика видно, что наибольшая по величине накопленная концентрация вредных примесей образуется при инверсионном состоянии атмосферы карьера.

Аналогично накоплению, разбавление примеси продолжительно во времени при устойчивом состоянии атмосферы карьера, в то время как при безразличном и неустойчивом состояниях этот процесс протекает значительно быстрее.

Так, 10-кратное разбавление концентрации для принятых законов распределения $k_{тy}$ происходит 60 час. при инверсии, 8—9 час. при безразличном состоянии, 1 час при неустойчивом состоянии.

Точность получения результатов с помощью используемого метода зависит от частоты сетки разбиения, однако при реализации схемы точность может быть потеряна за счет большого количества решающих элементов, что, кстати, сказывается и на надежность работы схемы в целом. Это противоречивое обстоятельство заставляет оптимизировать частоту разбиения и, естественно, определять уровень погрешности в каждом конкретном случае. Обычно погрешность решения подобных задач на АВМ лежит в пределах $6 \div 10\%$ в зависимости от сложности или объемности задачи.

ВЫВОДЫ

1. Приближенный метод математического моделирования процессов накопления и разбавления примесей в атмосфере карьеров с помощью АВМ применим и может быть рекомендован для прогнозирования опасных ситуаций.

2. Наибольшее абсолютное значение и продолжительное по времени сохранение концентрации вредных примесей наблюдаются при устойчивом состоянии атмосферы; это подтверждают и результаты настоящего исследования. Поэтому для быстрого снижения концентрации целесообразна искусственная турбулизация атмосферы карьера.

3. Внедрение наряду с физическими моделями математического моделирования позволит более полно определять процессы, происходящие в атмосфере карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин В. С. Вынос примесей из карьеров после шторма и массовых взрывов при рециркуляционных схемах проветривания. — Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 1966, вып. 39.
2. Никитин В. С. Проветривание карьера после шторма и массовых взрывов при прямоточно-рециркуляционной схеме. — Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, 1969, вып. 56.
3. Битколов Н. З. Исследование и условия проветривания карьеров турбулентными свободными струями. — В кн.: «Воздухообмен и микроклимат в карьерах». Челябинск, изд. НИИОГР, 1969.
4. Берлянд М. Е. и др. Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях стратификации. — Труды ГГО, 1964, вып. 158.
5. Корн Г., Корн Т. Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины. М., «Мир», 1968.

О ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

В настоящее время как за рубежом, так и в Советском Союзе имеется значительное число различных карьеров, глубина которых составляет 150—250 м и более.

С увеличением глубины карьера происходит заметное обособление карьерного пространства от атмосферы окружающего района, поэтому в нем начинает формироваться свой собственный микроклимат, определяющий в конечном итоге естественный воздухообмен и санитарно-гигиенические условия труда на рабочих местах, одной из важнейших характеристик которых является их тепловой режим [1].

Известно, что тепловой режим определяется тремя основными параметрами: скоростью ветра, температурой и относительной влажностью воздуха, изменение которых в глубоких карьерах имеет свои особенности. В настоящей статье использованы результаты проведенных авторами исследований в Коркинском, Ботабурумском, Зыряповском, Шаптюбинском и Аксайском карьерах. Для сравнения и подтверждения полученных результатов частично были использованы данные из опубликованных работ [2, 3, 4, 5, 6].

Скорость ветрового потока является одним из основных параметров, определяющих естественную аэрацию карьерного пространства, и формируется за счет совместного действия динамического (влияние поверхностных воздушных потоков) и термического (проявления неоднородностей теплового поля карьера) факторов [1]. Поверхностные воздушные потоки, встречая на своем пути карьерное пространство, омывают его, способствуя выносу выделяющихся в атмосферу аэрозолей и газов. Различно нагретые поверхности и элементы карьерного пространства формируют местные конвективные потоки, увеличивающие интенсивность естественного проветривания карьера.

На результирующую скорость ветра оказывает также влияние геометрия карьера и шероховатость подстилающей поверхности.

Комплексной характеристикой естественного воздухообмена в карьере может служить относительная скорость ветровых потоков [7], определяемая в общем случае выражениями [8]:

а) для прямоточной зоны

$$\Delta U_z = \varphi \frac{\ln(H-z) - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \quad (1)$$

или

$$\Delta U_z = \varphi \left(\frac{H-z}{H} \right)^m; \quad (2)$$

б) для зоны рециркуляции

$$\Delta U_z = U_0 [A(z-h)^2 + B(z-h) + C]. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) $\Delta U_z = U_z/U_0$ — относительная скорость ветрового потока для глубины z , U_z — скорость ветра на глубине z , U_0 — скорость ветрового потока на поверхности карьера, H — глубина карьера, z_0 — параметр шероховатости, φ — поправочный коэффициент, учитывающий изменение U_0 в пределах карьерного пространства ($\varphi=0,67$), m — показатель степени, изменяется от 0,3 до 0,5 и определяется устойчивостью атмосферы, степенью развития воздушного потока и местоположением рассматриваемого профиля в карьере, A, B, C — коэффициенты, характеризующие профиль потока в зоне рециркуляции, h — глубина границы рециркуляционной зоны для рассматриваемого сечения.

Из выражений (1)–(3) видно, что численные значения ΔU с увеличением глубины убывают. Это подтверждается данными измерений в отдельных точках для разных карьеров (табл. 1). Несмотря на большое разнообразие горнотехнических условий разработки полезного ископаемого и геометрических размеров карьеров, общая тенденция снижения ΔU при разработке нижних горизонтов предприятий различных климатических зон проявляется довольно отчетливо.

В годовом ходе относительной скорости ветровых потоков в карьере отмечаются значительные отклонения в отдельные месяцы от средних годовых значений, с четкой закономерностью возрастания в летний и осенний периоды года. Это объясняется интенсивным проявлением термического фактора в указанные периоды, когда местные потоки вследствие неоднородностей теплового поля почвы и воздуха усиливают ветровые потоки в пределах карьерного пространства.

Характер изменения относительной влажности воздуха (табл. 2) подтверждает общую закономерность ее годового хода, обратного годовому ходу температуры воздуха. В летний период величина относительной влажности воздуха уменьшается и несколько возрастает к зиме.

Таблица 1

Годовой ход изменения относительной скорости ветра в различных карьерах по месяцам

Карьер	H_m	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее годовое	Примечание
Коркинский	310	0,26	0,24	0,26	0,26	0,43	0,54	0,26	0,43	0,20	0,14	0,17	0,12	0,28	[2]
	300	0,22	0,23	0,33	0,38	0,39	0,40	0,37	0,41	0,37	0,22	0,19	0,22	0,31	[6]
		0,25	0,29	0,22	0,32	0,48	0,83	0,42	0,25	0,18	0,29	0,27	0,33	0,34	[5]
Сибайский	180	0,28	0,31	0,20	0,31	0,50	0,54	0,50	0,80	0,55	0,48	0,54	0,48	0,46	[2]
	170	0,27	0,20	0,21	0,25	0,27	0,23	0,22	0,25	0,22	0,23	0,16	0,25	0,23	[4, 5]
Ботабурум	140	—	—	—	—	—	0,21	0,21	0,21	0,19	0,23	0,20	—	—	1965 г.
Асбестовский	140	0,64	0,65	0,72	0,64	0,67	0,75	0,76	0,86	0,76	0,53	0,73	0,90	0,72	[2]
Учалинский	125	0,47	0,46	0,44	0,56	0,55	0,50	0,58	0,59	0,39	0,43	0,53	0,41	0,49	[2]
		0,35	0,28	0,30	0,36	0,35	0,32	0,38	0,50	0,32	0,31	0,35	0,31	0,34	[3]
Шантубе	90	0,34	0,40	0,39	0,39	0,44	0,31	0,33	0,48	0,42	0,44	0,47	0,33	0,40	1966 г.
Акса́й	50	0,55	0,52	0,63	0,52	0,53	0,52	0,53	0,50	0,45	0,42	0,40	0,46	0,50	1969 г.
		0,38	0,37	0,37	0,46	0,43	0,46	0,60	0,61	0,60	0,59	0,55	0,51	0,49	1970 г.

Годовой ход относительной влажности воздуха в карьере (ψ_k) и на поверхности (ψ_n) по месяцам

Карьер	H_m	$\psi\%$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее годовое	Примечание
Коркинский	310	ψ_k	79	78	77	65	52	68	71	62	75	67	73	80	71	—
		ψ_n	79	74	75	65	56	64	73	66	75	64	73	75	70	[2]
		$\Delta\psi_{k-n}$	0	4	2	0	—4	4	—2	4	0	3	0	5	1	—
Сибайский	180	ψ_k	78	72	71	61	50	58	59	58	62	59	66	69	64	—
		ψ_n	77	71	75	61	50	62	69	57	66	64	68	73	66	[2]
		$\Delta\psi_{k-n}$	1	1	—4	0	0	—4	—10	1	—4	—5	—2	—4	—2	—
Учалынский	125	ψ_k	—	—	—	62	52	66	65	54	75	—	—	—	—	—
		ψ_n	—	—	—	66	56	69	71	68	68	—	—	—	—	[2]
		$\Delta\psi_{k-n}$	—	—	—	—4	—4	—3	—6	—14	7	—	—	—	—	—
Аксай	50	ψ_k	77	71	66	68	40	26	31	27	32	48	72	79	53	—
		ψ_n	70	73	65	74	41	25	28	26	31	49	72	83	54	1970 г.
		$\Delta\psi_{k-n}$	1	—2	1	—6	—1	1	3	1	1	—1	0	—4	—1	—

Малое различие во влажностном режиме на дне карьера и его поверхности позволяет считать, что в глубоких карьерах заметных изменений относительной влажности не наблюдается.

Тепловое поле в пределах карьерного пространства формируется в основном за счет энергии поступающей солнечной радиации и внутренней теплоты земли. Величина поступления солнечной энергии зависит от времени суток и сезона года, а также от геометрии карьера и ориентации его слагающих плоскостей к солнечным лучам. Мощность теплового потока из недр земли определяется значениями геотермического градиента и теплофизическими свойствами горных пород. Хотя она значительно меньше поступающей солнечной энергии к бортам при большой глубине (с учетом снижения скорости ветровых потоков и ослабления турбулентного теплообмена), влияние геотермических ресурсов на тепловой режим глубоких карьеров может быть весьма ощутимым.

Изотермические поверхности почвы можно считать параллельными земной поверхности. Создание карьера как углубления в земной коре ведет к деформации изотермических плоскостей. Если в первом приближении профиль сечения карьерного пространства принять за изотермическую поверхность, то под карьером в определенном слое почвы будет наблюдаться сгущение изотермических линий по сравнению с первоначальным их распределением при отсутствии карьера. Это ведет к тому, что вертикальный температурный градиент в почве под карьером увеличивается и соответственно возрастает тепловой поток из почвы, что способствует увеличению теплосодержания поверхностного слоя почвы и воздуха на дне карьера.

Создание карьера ведет к вскрытию горизонтов с повышенным тепловым режимом, энергия из которых диссипируется за счет турбулентного теплообмена. С учетом значительного снижения скорости ветра и повышения теплового потока из почвы за счет внутреннего тепла Земли в глубоких карьерах следует ожидать более высокий тепловой режим по сравнению с его поверхностью.

Как видно из табл. 3, подавляющую часть времени года в исследованных карьерах отмечались положительные значения температурной разности $\Delta t_{к-п}$, что подтверждает наличие повышенного теплового режима дна карьера по сравнению с его поверхностью. Наблюдаемые в отдельных случаях отрицательные значения $\Delta t_{к-п}$ связаны, вероятно, с макропроцессами, характеризующимися общим длительным понижением температуры воздуха и последующей адвекцией тепла. Именно в такие периоды в карьерах отмечаются с повышенной частотой случаи инверсионного распределения температуры воздуха по глубине, что в ряде случаев приводит к накоплению примесей в атмосфере карьера [9].

Величина температурной разности $\Delta t_{к-п}$ для Ботабурумского карьера для всех исследованных месяцев с июня по ноябрь положительная, абсолютная величина ее в июле достигает $8,1^{\circ}\text{C}$. Это

Годовой ход разности температур поверхности почвы для дна и поверхности карьера $\Delta t_{к-п}$ °С и градиент γ °С/100 м по месяцам

Карьер	H м	$\Delta t_{к-п}$, γ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее годовое	Примечание
Коркинский	300°	$\Delta t_{к-п}$	4,0	2,0	1,0	1,0	1,6	1,0	1,6	2,4	1,4	-0,2	-2,5	2,4	1,3	[6]
		γ	1,33	0,67	0,33	0,33	0,53	0,33	0,53	0,80	0,47	-0,07	-0,83	0,80	0,43	
Ботабурум	140	$\Delta t_{к-п}$	—	—	—	—	—	7,5	8,1	7,8	6,4	3,8	0,8	—	—	1965 г.
		γ	—	—	—	—	—	5,35	5,80	5,58	4,57	2,72	0,57	—	—	
Аксай	50	$\Delta t_{к-п}$	0,9	1,2	0,9	2,2	1,3	0,2	0	1,9	0,3	-0,2	-0,1	0	0,7	1969 г.
		γ	1,8	2,4	1,8	4,4	2,6	0,4	0	3,8	0,6	-0,4	-0,2	0	1,4	
		$\Delta t_{к-п}$	0,2	1,2	1,3	1,5	1,0	0,2	0	1,9	1,0	0,6	0,1	0	0,8	1970 г.
		γ	0,4	2,4	2,6	3,0	2,0	0,4	0	3,	2,0	1,2	0,2	0	1,6	

объясняется особенностями геометрии карьерного поля при незначительных размерах в плане (карьер правильной круглой формы, диаметр по поверхности 370 м) глубина составляет 140 м., а средние значения относительной скорости ветра составляют всего 0,19—0,23. Весьма ослабленный турбулентный теплообмен за счет снижения скорости ветра в карьере и значительная глубина, способствующая проявлению геотермической ступени и формируют повышенный тепловой режим на дне карьера по сравнению с его поверхностью.

В целом по всем исследованным карьерам величина средней годовой разности $\Delta t_{к-п}$ также является положительной, что говорит о повышенном тепловом режиме дна карьера и в годовом цикле.

Зависимость теплового режима в карьерах от глубины видна из сравнения данных, приведенных в табл. 3, по величине температурного градиента, вычисленного для слоя дно — поверхность. Большая пространственная обособленность Ботабурумского карьера (отношение глубины к размеру в плане составляет 0,38) при интенсивном притоке тепла в летние и осенние месяцы способствует формированию значений геотермических градиентов, превышающих его средние величины, характерные для поверхностного слоя земной коры ($3^\circ/100$ м). Если учесть, что средние значения скоростей ветра в этом карьере невелики, то повышенные значения геотермических градиентов можно объяснить ослабленным турбулентным обменом. Кроме того, в глубоком карьере создаются особые условия многократного отражения от бортов всех составляющих радиационного баланса, поэтому величина поглощаемой энергии элементами карьерного пространства в летний период может быть довольно значительной.

Для Коркинского и Аксайского карьеров как величина градиента в отдельные месяцы года, так и средние годовые его значения существенно меньше среднего значения геотермического градиента. Это объясняется тем, что Коркинский и Аксайский карьеры являются сравнительно мелкими карьерами [10], ибо отношение глубины к размеру в плане составляет соответственно 0,10—0,14 и 0,12—0,15. В Коркинском и Аксайском карьерах наблюдаются довольно значительные скорости ветра (средние годовые значения $\bar{u}_k$ соответственно составляют 1,4 и 1,7 м/сек.), что существенным образом интенсифицирует массотеплообмен на разделе почва — воздух и способствует выравниванию теплового поля.

Специально поставленные экспедиционные и стационарные геотермические исследования [11, 12] также подтвердили наличие повышенного теплового режима поверхностного слоя почвы на дне карьера по сравнению с его поверхностью. На рис. 1 приведены средние месячные геотермы для дна и поверхности карьера Аксай по скважинам глубиной 25 м. Из рисунка видно, что графики распределения температуры по глубине слоя почвы представляют собой кривые, изменяющиеся асимптотически около

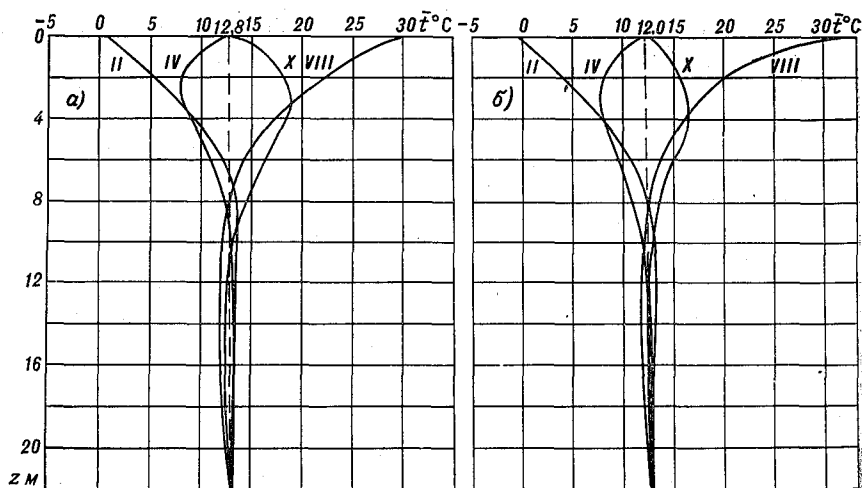


Рис. 1. Распределение средних месячных геотерм по скважинам дна (а) и поверхности (б) карьера Аксай.

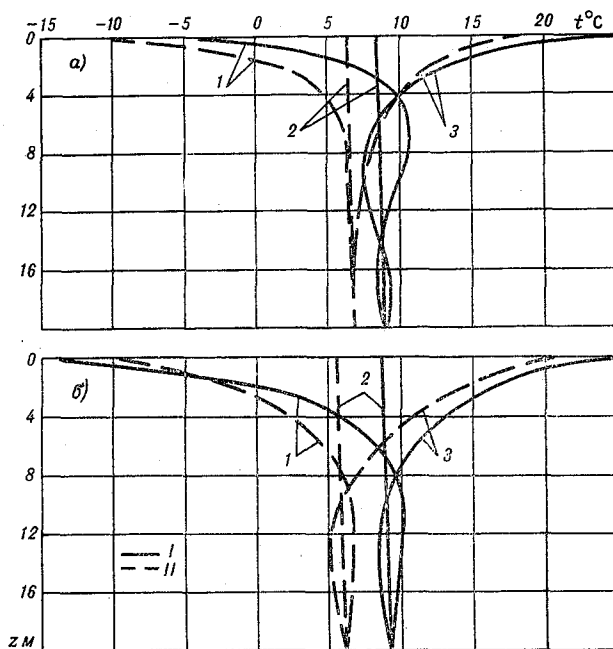


Рис. 2. Характер распределения геотерм по Коркинскому (а) и Зырянковскому (б) карьерам.

I — дно карьера, II — поверхность; 1 — геотермы зимнего сезона (21 января 1970 г. — Коркинский и 29 января 1970 г. — Зырянковский карьеры), 2 — линии геотермического градиента, 3 — геотермы летнего сезона (21 июля 1969 г. — Зырянковский и 30 июля 1969 г. — Коркинский карьеры).

линии геотермического градиента, пересечение которой с осью температур дает значение средней многолетней температуры поверхности почвы в исследуемой точке. Полученные значения температуры поверхности почвы ($\bar{t}_{\text{пш}}=12,0$ и $\bar{t}_{\text{пк}}=12,8^\circ\text{C}$) хорошо согласуются с результатами проведенных микроклиматических исследований и подтверждают вывод о повышенном тепловом режиме дна карьера. К аналогичному выводу приводит также анализ материалов сезонных экспедиционных геотермических исследований по Коркинскому и Зырянскому карьерам (рис. 2). Значения температурной разности $\Delta t_{\text{к-п}}$ по средним многолетним данным составляют $2,0^\circ\text{C}$ для Коркинского и $3,2^\circ\text{C}$ для Зырянского карьера, значения температурного градиента соответственно $0,67^\circ\text{C}/100\text{ м}$ и $2,46^\circ\text{C}/100\text{ м}$. Полученная величина температурного градиента поверхности почвы для Зырянского карьера, у которого соотношение глубины и размера в плане составляет $0,14\text{—}0,18$, довольно близка к среднему значению геотермического градиента. В этом проявляется одна из характернейших особенностей микроклиматического режима Зырянского карьера и вообще всего района в целом, для которого подавляющую часть времени года (около $70\text{—}95\%$) господствует безветренная, штилевая погода [13].

Характер изменения температуры воздуха, измеряемой на высоте 2 м и от поверхности почвы, как в карьере, так и на его поверхности в основном соответствует изменению температуры поверхности почвы, что хорошо видно из данных табл. 4. Для всех рассмотренных карьеров как по сезонам года, так и по средним годовым данным величина температурной разности $\Delta t_{\text{к-п}}$ является положительной, что говорит о повышенном тепловом режиме самого карьера в сравнении с его поверхностью. Эта закономерность особенно отчетливо проявляется для Ботабурумского карьера, где величина температурного градиента, в летнее время намного превосходит адиабатический градиент. Для других карьеров величина температурного градиента как по средним месячным, так и по средним годовым данным в подавляющем большинстве случаев ниже адиабатического, что свидетельствует о повышенной частоте появления в карьерах инверсионных распределений температуры. Таким образом, анализ проведенных микроклиматических и геотермических исследований на нескольких карьерах разной глубины и в разных климатических зонах позволяет сделать следующие выводы.

1. Дно глубокого карьера характеризуется повышенным тепловым режимом по сравнению с его поверхностью.

2. Величина дифференциации теплового режима определяется главным образом особенностями поступления и распределения солнечной энергии к элементам карьерного пространства, величиной геотермической ступени, геометрией карьера, теплофизическими характеристиками горных пород и степенью трансформации поверхностных ветровых потоков.

Годовой ход разности температур воздуха надне и поверхности карьера $\Delta t_{к-п}$ °С/100 м
по месяцам

Карьер	H м	$\Delta t_{к-п}$, °	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее годовое	Примечание
Коркинский	310	$\Delta t_{к-п}$ °	2,7 0,87	0,9 0,29	2,3 0,74	2,9 0,93	2,4 0,77	2,6 0,84	2,4 0,77	2,4 0,77	2,0 0,64	1,6 0,52	1,7 0,55	0,3 0,09	1,9 0,61	[2]
Сибайский	180	$\Delta t_{к-п}$ °	2,0 1,11	2,7 1,50	1,8 1,60	1,5 0,83	1,5 0,83	1,5 0,83	2,4 1,33	1,9 1,05	1,5 0,83	2,0 1,11	1,9 1,05	2,0 1,11	1,8 1,00	[2]
Богатбурм	140	$\Delta t_{к-п}$ °	— —	— —	— —	— —	— —	5,3 3,78	7,1 5,06	5,5 3,93	7,5 5,36	3,2 2,28	1,7 1,21	— —	— —	1965 г.
Асбестов- ский	140	$\Delta t_{к-п}$ °	0,3 0,21	0,3 0,21	0,5 0,36	0,7 0,50	0,9 0,64	1,2 0,86	0,9 0,64	0,9 0,64	0,9 0,64	1,5 1,07	0,3 0,21	1,1 0,78	0,8 0,57	[2]
Учалинский	125	$\Delta t_{к-п}$ °	0,2 0,16	1,2 0,96	1,4 1,12	1,2 0,96	0,9 0,72	1,0 0,80	1,0 0,80	0,6 0,48	1,7 0,56	1,0 0,60	0,8 0,64	1,3 0,04	1,1 0,88	[2]
Аксай	50	$\Delta t_{к-п}$ °	0,2 0,4	0,2 0,4	0,1 0,2	0,2 0,4	0,4 0,8	0,3 0,6	0,2 0,4	0,2 0,4	0,1 0,2	0,2 0,4	0,1 0,2	0,0 0	0,2 0,4	1970 г.

3. Действие энергии глубинных слоев Земли в глубоких карьерах возрастает, что в определенной степени интенсифицирует естественный воздухообмен.

4. Повышенная частота появления инверсионных распределений температуры и малые значения температурных градиентов требуют применения дополнительных средств для искусственной аэрации глубоких карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. М., Госгортехиздат, 1963.
2. Силин Ф. М. Микроклимат карьеров Урала. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 10.
3. Силин Ф. М., Карпов А. А. Связь загрязнения атмосферы и проветривания Учалинского карьера с метеоусловиями. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 10.
4. Силин Ф. М. Исследование микроклимата карьеров Урала. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1967, вып. 6.
5. Силин Ф. М., Бухман Я. З. Зависимость загазованности карьеров от метеорологических условий. — В кн.: «Опыт борьбы с загазованностью и загрязненностью атмосферы карьеров». М., изд. ЦИИНЦМ, 1968.
6. Силин Ф. М., Ивашкин В. С. Исследование микроклимата Коркинского угольного карьера. — В кн.: «Воздухообмен и микроклимат в карьерах». Челябинск, изд. НИИОГР, 1969.
7. Битколов Н. З., Хирви В. А. Закономерность и причины изменения скорости ветра в карьерах в течение года. — В кн.: «Воздухообмен и микроклимат в карьерах». Челябинск, изд. НИИОГР, 1969.
8. Битколов Н. З. и др. Характер изменения скорости ветра в карьерах. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
9. Лидин Г. Д. Условия, приводящие к загазованию Коркинского угольного карьера. — В кн.: «Проблемы борьбы с рудничными газами и пылью». М., «Наука», 1969.
10. Битколов Н. З., Иванов И. И. Основные закономерности и расчет естественного проветривания карьеров энергией ветра. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
11. Битколов Н. З., Иванов И. И. Результаты исследований геотермического режима в карьерах. — В кн.: «Разработка месторождений полезных ископаемых в условиях высокогорья и жаркого климата». Ташкент, изд. УзИНТИ, 1969.
12. Иванов И. И. О геотермических исследованиях в карьерах. — Труды ГГО, 1971, вып. 294.
13. Клик В. Р., Чулаков П. Ч., Ахметов О. Микроклимат и аэродинамика Зырянского карьера. — Труды Казахского политех. ин-та, 1962, вып. 22.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ИНВЕРСИЙ В КАРЬЕРАХ

Механизм нарушения естественного воздухообмена в карьерах, влекущий за собой накопление примесей в атмосфере, в подавляющем большинстве случаев связан с устойчивой стратификацией атмосферы, характеризующейся инверсионным распределением температуры в определенных слоях по глубине.

В зависимости от продолжительности сохранения устойчивого состояния, скорости поверхностных воздушных потоков и интенсивности источников выделения вредных примесей задачи искусственного проветривания будут меняться, но при любых условиях ее успешное решение возможно только при разрушении инверсионного состояния.

С точки зрения экономических затрат наиболее целесообразным является оперативный прогноз инверсионного состояния со своевременным включением в работу соответствующих комплексов с целью предупреждения развития инверсии и, следовательно, вероятности накопления примесей до концентраций, превышающих санитарные нормы.

Побудителями движения воздуха могут быть механические, тепловые или комбинированные средства. Тепловой источник принципиально можно рассматривать как механический, создающий восходящий поток. В практике эксплуатации карьеров в настоящее время предложены различные схемы искусственного проветривания и ряд вентиляторных установок, однако теоретическое обоснование рассматриваемого процесса и возможности применения тех или иных средств для разрушения инверсии отсутствует.

Инверсионная стратификация атмосферы характеризуется дефицитом тепловой энергии в нижних слоях по сравнению с верхними, ликвидация которого определяет и возможные пути активизации воздухообмена в карьерах. При этом, естественно, существенное значение имеют условия подвода и удаления воздуха относительно проветриваемой зоны.

Перемещение воздуха в карьере снизу вверх сохраняет устойчивость и по мере удаления загрязненного воздуха из нижней

зоны изменяются лишь границы инверсии. Горизонтальный перенос обеспечивает интенсивное перемешивание воздуха, формируя изотермическую стратификацию, которая также является устойчивой. Подвод воздуха сверху вниз ведет к перемещению более теплых масс воздуха на дно карьера, формируя неустойчивость в нижней зоне. По мере увеличения количества поданного воздуха дефицит тепла нижних слоев уменьшается, что ведет к перестройке профиля температуры в карьерном пространстве и к постепенному разрушению инверсии.

Подача воздуха в карьер может осуществляться с его поверхности или с какого-либо промежуточного уступа в зависимости от характера инверсии. Не рассматривая теплообмен на границе системы почва — воздух, выведем уравнения теплового состояния воздуха в карьере при подводе воздушных масс с поверхности.

Пусть температурная стратификация в карьере в общем случае характеризуется функциональной зависимостью

$$t = f(z), \quad (1)$$

частными случаями которой могут быть (рис. 1) общекарьерная (кривая 1), приподнятая (кривая 2) или приземная (кривая 3) инверсии, а также их различные комбинации.

В случае общекарьерной инверсии распределение температуры по глубине имеет вид

$$t_z = t_0 + \gamma z, \quad (2)$$

где t_0 — температура воздуха на поверхности, т. е. на глубине $z=0$, $\gamma = \frac{\partial t}{\partial z}$ — вертикальный градиент температуры соответствующих слоев карьера.

Для приземной инверсии

$$t_z = t_0 + (H_1 + H_2) \gamma_{1-2} + H_3 \gamma_3. \quad (3)$$

В случае приподнятой инверсии

$$t_z = t_0 + H_1 \gamma_1 + H_2 \gamma_2 + H_3 \gamma_3. \quad (4)$$

Разобьем профиль карьера (рис. 2) горизонтальными плоскостями. Пренебрегая значениями горизонтальных градиентов температуры воздуха ввиду их малости по сравнению с вертикальными градиентами и принимая на период разрушения инверсии

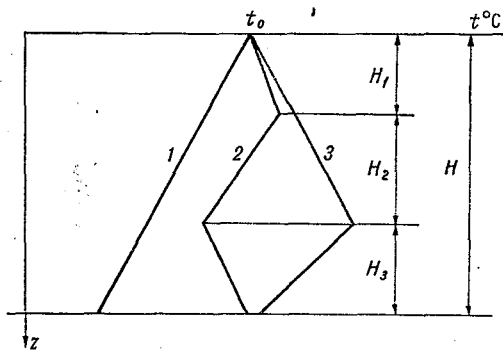


Рис. 1. Основные виды температурной стратификации в карьере.

1 — общекарьерная инверсия, 2 — приподнятая, 3 — приземная.

значение $t_0 = \text{const}$, для каждого из сечений запишем выражения теплосодержания массы (в джоулях) в струе подаваемого воздуха.

В начальном сечении $0-0$

$$J_0 = q_0 c_0 t_0 \tau, \quad (5)$$

где q_0 — начальный расход струи ($\text{м}^3/\text{сек.}$), c_0 — удельная объемная теплоемкость воздуха ($\text{дж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$), τ — время работы вентиляционной установки (сек.).

Перемещение воздуха на глубину Δz приведет к тому, что температура ее изменится. Будем считать ее равной средней тем-

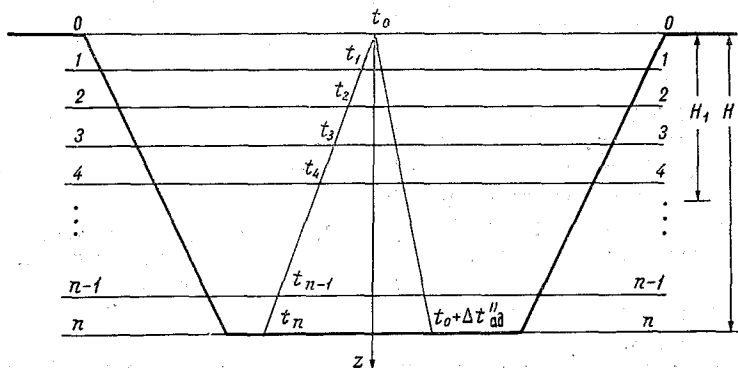


Рис. 2. Схема разбиения температурного профиля карьера.

пературе в пределах перемещаемого слоя плюс пропорциональное перемещаемому объему возрастание температуры за счет адиабатического сжатия. Тогда для сечения $1-1$ получим

$$J_1 = \eta (q_0 + \Delta q_1) c_1 \left(\frac{t_0 + t_1}{2} + \frac{q_0 + \frac{1}{2} \Delta q_1}{q_0 + \Delta q_1} \Delta t_{ад}^{1-0} \right) \tau, \quad (6)$$

где Δq_1 — приращение расхода в струе на участке $0-1$, c_1 — удельная теплоемкость воздуха для сечения $1-1$, $\Delta t_{ад}^{1-0}$ — величина разности температур, соответствующая значению сухадиабатического градиента ($\gamma_a \approx 1^\circ\text{C}/100\text{ м}$) для интервала $0-1$, η — коэффициент эффективности струи.

В общем случае для n слоя выражение теплосодержания массы воздуха в струе принимает вид

$$J_n = \eta \left(q_0 + \sum_{i=1}^n \Delta q_i \right) c_n \left(\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + \frac{q_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i}{q_0 + \sum_{i=1}^n \Delta q_i} \Delta t_{ад}^{n-0} \right) \tau. \quad (7)$$

Так как величина атмосферного давления и температура изменяются в небольших пределах, можно принять

$$c_0 = c_1 = c_2 = \dots = c_n = c. \quad (8)$$

Величина

$$q_0 + \sum_{i=1}^n \Delta q_i = q_n \quad (9)$$

и представляет собой расход воздуха в струе, в сечении, прилежащем к подошве карьера.

С другой стороны,

$$q_n = 2,18 q_0 \left(\frac{aL}{R_0} + 0,29 \right), \quad (10)$$

где a — коэффициент структуры струи, L — расстояние до рассматриваемого сечения струи, R_0 — начальный радиус струи.

Значения температурной разности $\Delta t_{ад}^{0-n}$ соответствуют адиабатическому градиенту для всего слоя H , т. е.

$$\Delta t_{ад}^{0-n} = \Delta t_{ад}^H = \gamma_a H. \quad (11)$$

С учетом уравнения (9) преобразуем выражение

$$\frac{q_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i}{q_0 + \sum_{i=1}^n \Delta q_i} = \frac{q_n - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i}{q_n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{q_0}{q_n} \right) = a'. \quad (12)$$

Коэффициент эффективности струи η определяет объемы чистого воздуха, подаваемого в проветриваемую зону. При развитии инверсии в масштабе всего карьера количество чистого воздуха, подаваемого в карьер, практически равно производительности вентиляторной установки (q_0). Если инверсия отсутствует, то количество чистого воздуха, поступающего в нижнюю часть карьера, будет максимальным и определяется параметрами вентиляторной установки, а также относительной глубиной карьера $p = H/L_n$, где L_n — средний размер карьерного пространства по поверхности. С увеличением относительной глубины карьера, а также в зависимости от места установки вентилятора и мощности того или иного вида инверсии эффективность вентиляционных агрегатов меняется. В общем случае значение коэффициента эффективности струи на основе результатов производственных исследований и моделирования можно определить по формуле

$$\eta = \frac{1-p}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{H_n}{H} \right), \quad (13)$$

где H и H_n — соответственно высота установки вентилятора и верхняя граница инверсии, считая от дна карьера.

Выражение (7) с учетом уравнений (8), (9), (11) и (12) принимает вид

$$J_n = \eta q_n c \left(\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + \alpha' \gamma_a H \right) \tau. \quad (14)$$

Перемещение воздушных масс в инверсионных слоях сверху вниз сопровождается переносом избыточного тепла. Для рассматриваемых условий приращение теплосодержания в сечении $n - n$ равно

$$\Delta J_n = J_n - \eta q_n c t_n \tau. \quad (15)$$

С учетом (14) уравнение (15) можно записать

$$\Delta J_n = \eta q_n c \tau \left(\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + \alpha' \gamma_a H - t_n \right). \quad (16)$$

Величина тепловой энергии ΔJ_n идет на нагрев воздуха объемом V_1 (в своем пределе объем V_1 может достигать объема всего карьерного пространства V_K). При этом приращение температуры данного объема составит

$$\Delta t_n = \frac{\Delta J_n}{V_1 c} \quad (17)$$

или с учетом уравнения (16)

$$\Delta t_n = \eta K \left(\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + \alpha' \gamma_a H - t_n \right), \quad (18)$$

где $K = \frac{q_n \tau}{V_1}$ — коэффициент обмена.

За счет подвода воздуха сверху температура его в сечении $n - n$ возрастает до величины $t_0 + \gamma_a H$, отсюда необходимый прирост температуры для полного разрушения инверсионного состояния в карьере составит

$$\Delta t_T = t_0 - t_n + \gamma_a H. \quad (19)$$

Потребное для разрушения инверсии количество воздуха определится из условия равенства значений Δt_n и Δt_T . Приравняв друг другу правые части выражений (18) и (19) и выполнив небольшие преобразования, получим

$$Q = q_n \tau = \frac{\frac{V_1}{\eta} (t_0 - t_n + \gamma_a H)}{\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + \alpha' \gamma_a H - t_n}. \quad (20)$$

По известным значениям объема инверсии V_1 , температурного профиля $t_z=f(z)$ и при определенных параметрах вентиляционной установки (q_0 , R_0 , L) время, необходимое для разрушения инверсии в карьере, определяется формулой

$$\tau_{\max} = \frac{\frac{V_1}{\eta q_n} (t_0 - t_n + \gamma_a H)}{\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + a' \gamma_a H - t_n} \quad (21)$$

или с учетом уравнения (10)

$$\tau_{\max} = \frac{\frac{V_1 (t_0 - t_n + \gamma_a H)}{2,18 \eta q_0 \left(\frac{aL}{R_0} + 0,29 \right)}}{\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + a' \gamma_a H - t_n} \quad (22)$$

Задавая время работы установок, их количество и производительность, можно определить значения температуры нижнего слоя воздуха t'_n в данный момент времени.

Из уравнения (20) при $\Delta t_{\tau} = t'_n - t_n$ получим

$$t'_n = \left(1 - \eta \frac{Q}{V_1} \right) t_n + \eta \frac{Q}{V_1} \left(\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + a' \gamma_a H \right) \quad (23)$$

Время достижения изотермического состояния в карьере определится из условия $t'_n = t_0$

$$\tau_{\text{из}} = \frac{\frac{V_1}{\eta q_n} (t_0 - t_n)}{\frac{t_0 + \sum_{i=1}^n t_i}{n+1} + a' \gamma_a H - t_n} \quad (24)$$

Вычислив значения t'_n для нескольких последовательных значений $\tau \leq \tau_{\max}$, получим семейство характеристик, описывающих процесс разрушения инверсии в карьере под действием изотермической струи (рис. 3). Полученные характеристики наглядно иллюстрируют процесс интенсификации естественного воздухообмена в карьерном пространстве, но являются приближенными. В реальных условиях с учетом теплообмена почва — воздух зависимости имеют несколько иной вид в пограничной зоне (рис. 3,

кривые 2) за счет сохранения в самой нижней части карьера некоторого устойчивого слоя при наличии отрицательного теплового потока в почву, что увеличивает расходы воздуха на проветривание на величину

$$\phi = \frac{V + V_{\text{и}}}{V}, \quad (25)$$

где $V_{\text{и}}$ — объем зоны инверсии (м^3).

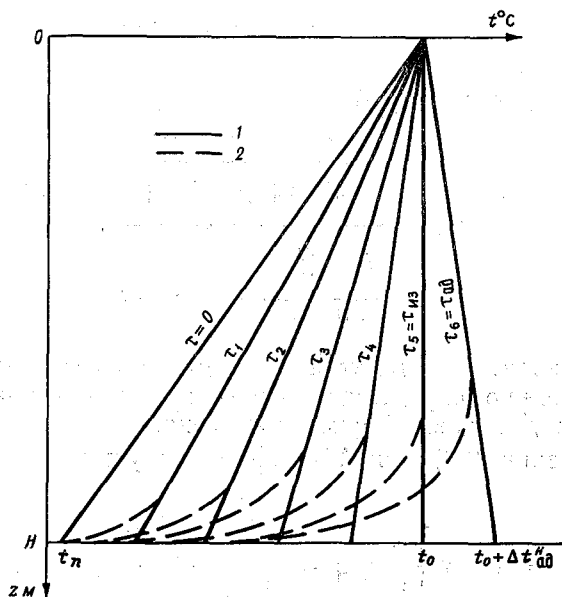


Рис. 3. Характер изменения температурного профиля при разрушении инверсии в карьере.

1 — теоретические характеристики, 2 — с учетом теплообмена почва — воздух.

В целом предлагаемый метод расчета процессов разрушения инверсии позволяет аналитически обосновать выбор вентиляционных агрегатов для интенсификации естественного воздухообмена в карьерах. Анализ полученных уравнений подтверждает целесообразность верхнего размещения установок для проветривания в зоне чистого, более теплого воздуха при разрушении и предупреждении зарождения инверсий.

Пример расчета. Карьер имеет размеры: $H=150$ м, $L_{\text{п}}=500$ м, $V=10^7$ м^3 . Характеристики вентиляторной установки: $R_0=0,5$ м, $U_0=45$ м/сек., $a=0,07$, угол наклона оси струи к вертикали $\alpha=60^\circ$, $L_{\text{стр}}=H/\cos \alpha=300$ м.

Начальный расход струи

$$q_0 = S_0 U_0 = \pi R_0^2 U_0 = 3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 45 = 35,5 \text{ м/сек.}$$

Расход в конечном сечении

$$q_n = 2,18 \cdot 35,3 \left(\frac{0,07 \cdot 300}{0,5} + 0,29 \right) = 3250 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Величина коэффициента

$$\alpha' = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{q_0}{q_n} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{35,3}{3250} \right) = \frac{1}{2} (1 - 0,010085) = 0,495.$$

Рассмотрим условия разрушения инверсии для трех случаев, принимая $n=10$.

1. Общекарьерная инверсия: $t_0=8,0^\circ \text{C}$, $t_n=3,5^\circ \text{C}$, $V=V_1=10^7 \text{ м}^3$; $p=H/L_n = \frac{150}{500} = 0,3$; $\psi = \frac{V+V_n}{V} = 2$.

Коэффициент эффективности струи

$$\eta = \frac{1-0,3}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{150}{150} \right) = 0,35 \cdot 0,5 = 0,175.$$

Время проветривания

$$\tau_{\max} = \frac{2 \cdot \frac{10^7}{0,175 \cdot 3250} (8,0 - 3,5 + 0,01 \cdot 150)}{\frac{8,0 + 55,5}{11} + 0,495 \cdot 0,01 \cdot 150 - 3,5} = 7,06 \cdot 10^4 \text{ сек.}$$

Коэффициент обмена

$$K = \frac{q_0 \tau_{\max}}{V} = \frac{35,3 \cdot 7,06 \cdot 10^4}{10^7} = 0,25.$$

2. Приподнятая инверсия: $t_0=8,0^\circ \text{C}$, $t_n=8,0^\circ \text{C}$, $t_{60}=9,0^\circ \text{C}$, $t_{120}=7,0^\circ \text{C}$, $V_1=5,0 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Коэффициент эффективности струи

$$\eta = 0,35 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{120}{150} \right) = 0,35 \cdot 0,6 = 0,21.$$

Значение коэффициента

$$\psi = \frac{V+V_n}{V} = 1 + \frac{V_n}{V} = 1 + \frac{5,0 \cdot 10^6}{10^7} = 1,50.$$

Время проветривания

$$\tau_{\max} = \frac{1,50 \cdot \frac{5,0 \cdot 10^6}{0,21 \cdot 3250} (8,0 - 8,0 + 0,01 \cdot 150)}{\frac{8,0 + 81,1}{11} + 0,495 \cdot 0,01 \cdot 150 - 8,0} = 2,01 \cdot 10^4 \text{ сек.}$$

Коэффициент обмена

$$K = \frac{35,3 \cdot 2,01 \cdot 10^4}{10^7} = 0,07.$$

3. Приземная инверсия: $t_0 = 8,0^\circ \text{C}$, $t_n = 8,5^\circ \text{C}$, $t_{75} = 11,0^\circ \text{C}$,
 $V_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Коэффициент эффективности струи

$$\eta = 0,35 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{75}{150} \right) = 0,35 \cdot 0,75 = 0,262.$$

$$\psi = 1 + \frac{V_n}{V} = 1 + \frac{1,5 \cdot 10^6}{10^7} = 1,15.$$

Время проветривания

$$\tau_{\max} = \frac{1,15 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^6}{0,262 \cdot 3250} \cdot (8,0 - 8,5 + 0,01 \cdot 150)}{\frac{8,0 + 96,0}{11} + 0,495 \cdot 0,01 \cdot 150 - 8,5} = 1,20 \cdot 10^3 \text{ сек.}$$

Коэффициент обмена

$$K = \frac{35,3 \cdot 1,20 \cdot 10^3}{10^7} = 0,004.$$

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В КАРЬЕРЕ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Углубление карьеров, характерное для современного этапа развития горнодобывающей промышленности, вызывает ухудшение естественного воздухообмена в нем и увеличение повторяемости условий, при которых концентрация вредных примесей превышает предельно допустимые нормы. Одним из путей предотвращения опасных для здоровья людей загазованности и запыленности в карьерах является внедрение искусственной вентиляции [1]. Наиболее перспективным в этом направлении является, очевидно, использование свободных турбулентных струй, создаваемых специальными устройствами [2, 3]. Турбулентная струя, обладающая достаточной исходной мощностью, не только выносит за пределы карьера загрязненный воздух, но и, как будет показано ниже, уменьшает термическую устойчивость атмосферы в карьере, способствуя интенсификации естественного воздухообмена.

1. Перестройка поля температуры в карьере. Наибольшая эффективность искусственного проветривания достигается при расположении вентиляционных струйных установок в нижней части карьера. Струя, создаваемая такой установкой, должна обладать вертикальной составляющей скорости, достаточной для того, чтобы выходить за пределы карьера, и выносить из него загрязненный воздух. Тогда вне струи в карьере создается нисходящий компенсирующий поток воздуха. Опускающийся воздух нагревается вследствие адиабатического сжатия. Поскольку скорость опускания воздуха на различных уровнях оказывается разной, происходит изменение профиля температуры по всему карьере.

Будем полагать, упрощая задачу, что турбулентное перемешивание по вертикали пренебрежимо мало и что опускание воздуха в карьере на фиксированном уровне происходит с одинаковой скоростью на любом расстоянии от струи. Тогда изменение температуры T на произвольном уровне можно записать

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = W (\gamma - \gamma_a), \quad (1)$$

где γ — градиент температуры на соответствующем уровне в карьере, γ_a — сухоадиабатический градиент, W — скорость опускания воздуха вне струи, τ — время.

Скорость опускания W определяется из соотношения

$$m + \rho S_K W = 0, \quad (2)$$

где m — секундная масса струи, ρ — плотность воздуха вне струи, S_K — площадь сечения карьера.

(Строго говоря, в уравнении (2) следует писать не S_K , а $S_K - S$ — разность площадей сечения карьера и струи. Обычно $S_K \gg S$.)

Таким образом,

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = - \frac{m}{\rho S_K} (\gamma - \gamma_a). \quad (3)$$

Непосредственное интегрирование уравнения (3) затруднено тем, что $\gamma = \gamma(\tau)$, причем вид этой функции определяется в свою очередь зависимостями $m = m(z)$ и $S_K = S_K(z)$. Задача может быть решена при численном интегрировании системы уравнений типа (3), составленных для различных уровней в карьере, с шагом по времени $\Delta\tau$, в течение которого γ можно считать постоянным.

Практически удобно «следить» за опусканием и нагреванием индивидуальных частиц (отождествляемых с соответствующими слоями), изображая графически результаты каждого шага. Выбрав на кривой стратификации в исходный момент ряд точек, «опускаем» их на $\Delta z = W \Delta\tau$, одновременно «нагревая» на $\Delta T = \gamma_a \Delta z$. Соединив последовательно новые координаты точек, получим стратификацию, соответствующую моменту $\Delta\tau$. Повторяя эту операцию, легко получить распределение температуры в карьере с высотой при любой продолжительности работы струйной установки.

Пример расчета изменения температуры в карьере при искусственной вентиляции представлен на рис. 1. Расчет выполнен для струи, создаваемой реактивным двигателем (РД-3М). Координаты оси струи и соответствующая им секундная масса, рассчитанные на основе модификации [4] теории струй [5], приведены в табл. 1. Предполагается, что струя вытекает из сопла, установленного горизонтально. Проходя значительный путь в нижней части карьера, струя захватывает большую массу загрязненного воздуха, затем под действием сил плавучести она искривляется, поднимается вверх и выходит за пределы карьера.

Такое поведение струи определяет характерный профиль скорости опускания воздуха в карьере с максимумом вблизи дна, где наблюдается быстрый рост температуры в первые минуты работы двигателя. Скорость роста температуры замедляется при приближении γ к γ_a . Перестройка профиля температуры в карьере полностью заканчивается в момент, когда воздух, находившийся в исходный момент на верхней границе карьера, достигает его дна — к этому времени во всем карьере устанавливается градиент $\gamma = \gamma_a$.

Настоящий расчет проведен в предположении постоянства температуры воздуха, поступающего в карьер через его верхнее

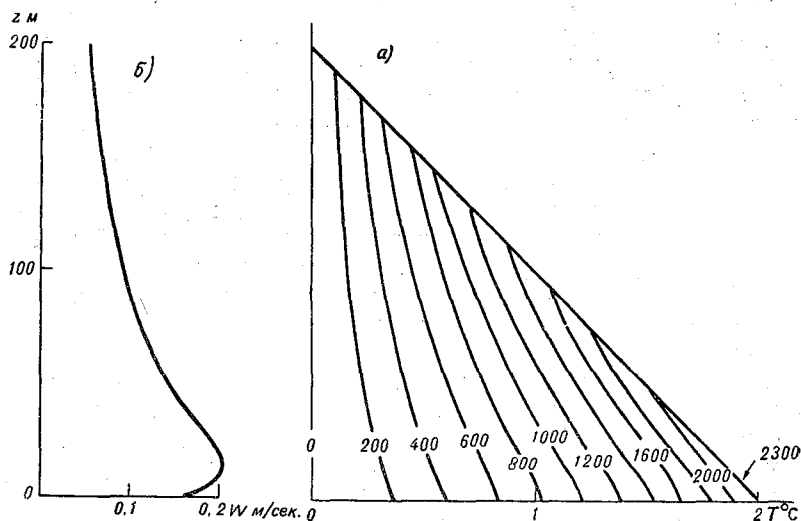


Рис. 1. Трансформация профиля температуры в карьере при работе реактивного двигателя (а) и профиль скорости нисходящего потока вне струи (б). Штиль, изотермия.

Параметры карьера: радиус дна 100 м, радиус верхнего сечения 500 м, глубина 200 м. Цифры у кривых — время, отсчитанное с момента включения двигателя (сек.)

сечение. Это предположение не представляется слишком надуманным, так как в реальных условиях затекание воздуха в чашу карьера осуществляется, по-видимому, скорее по горизонтали, чем по вертикали.

Таблица 1

z м	x м	m кг/сек.	z м	x м	m кг/сек.
0	0	130	134	234	39 311
0,2	23	3 131	150	244	42 340
1,2	47	5 135	165	253	45 342
9,8	95	12 144	181	261	48 352
18,0	118	15 161	212	278	54 377
29	138	18 166	243	296	64 402
42	157	21 198	274	318	66 425
57	174	24 216	301	352	72 471
72	188	27 230	295	375	75 477
87	201	30 249	265	403	81 497
102	213	33 274	250	413	84 528
118	224	36 290			

Характер движения струй, их траектории в значительной мере определяются метеорологическими условиями, в частности температурной стратификацией [6]. С усилением устойчивости атмосферы высота подъема струи резко уменьшается. Говоря о высоте подъема струи, следует иметь в виду, что в условиях устойчивой атмосферы вследствие инерционности струя совершает затухающие колебательные движения относительно некоторого уровня (рис. 2). Этот уровень следовало бы формально принимать за высоту подъема струи. Однако в условиях карьера для струи, обладающей, как в рассмотренном примере, горизонтальной составляющей скорости, можно, очевидно, разумным выбором местоположения струйной установки добиться того, чтобы нисходящий участок траектории оказался за пределами карьера. В этом случае под высотой подъема струи можно подразумевать высоту первого максимума.

1
3 Легко представить себе, впрочем, условия, при которых и эта высота окажется меньше глубины карьера. Это не означает, конечно, что искусственная вентиляция карьера в данной ситуации не имеет смысла. Во-первых, в результате действия струи происходит перемешивание воздуха в объеме карьера, что приводит к выравниванию концентраций примесей. Во-вторых, — и это главное, — появление замкнутой циркуляции с восходящим потоком в зоне струи и компенсирующим нисходящим в свободном пространстве карьера способствует, как и в рассмотренном выше примере, уменьшению устойчивости.

Изменение стратификации в нижней части карьера в сторону уменьшения устойчивости приведет к увеличению высоты подъема струи, т. е. к увеличению толщины слоя, в котором осуществляется перестройка температурного поля; это снова будет способствовать увеличению высоты подъема струи и так далее, до тех пор пока струя не достигнет верхней границы карьера и не выйдет из него. Таково качественное объяснение процесса.

На рис. 2 приводятся результаты количественных расчетов. Как и для рис. 1, расчеты выполнены для струи реактивного двигателя, карьер задан в виде перевернутого усеченного конуса, глубина карьера при тех же радиусах верхнего и нижнего сечений задана большей — 300 м. В исходный момент времени, характеризующийся инверсионным распределением температуры во всем карьере ($\gamma = -2^\circ\text{C}/100\text{ м}$), максимальная высота подъема струи (точнее — ее оси) не превышает 160 м. Для выбранного соотношения параметров струи и карьера скорость изменения температуры в нижнем слое оказывается достаточно большой. Через 17 мин. после включения двигателя температура воздуха на дне карьера повысилась на 4°C , а стратификация в слое толщиной около 200 м вместо инверсионной стала изотермической. Примерно через полчаса после начала работы струя достигает верхней границы карьера. Дальнейшее изменение профиля температуры будет осуществляться так же, как в примере, приведенном на рис. 1.

Конечно, полученные результаты дают максимально возможную оценку изменения температуры. В действительности за счет теплообмена опускающегося воздуха со стенками карьера изменения температуры будут несколько меньше. Заметим также, что уменьшение устойчивости и повышение температуры в карьере

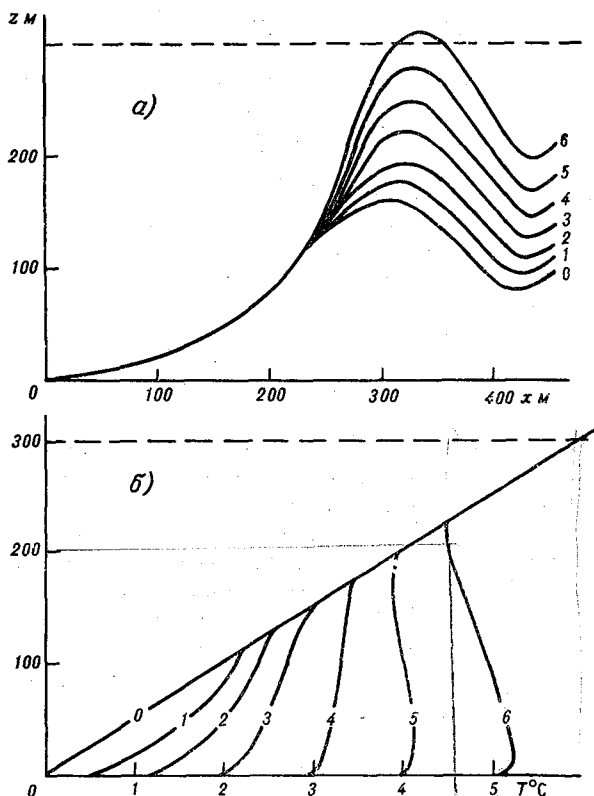


Рис. 2. Траектории оси струи реактивного двигателя (а) и профили температуры в карьере (б).
0 — в исходный момент, 1 — через 100 сек., 2 — через 200, 3 — через 350, 4 — через 650, 5 — через 1050, 6 — через 1650 сек.

будут наблюдаться лишь при устойчивой исходной стратификации. В случае неустойчивой стратификации будет происходить понижение температуры в карьере и уменьшение неустойчивости. Предельным распределением в обоих случаях является сухорадиационный градиент.

С трансформацией профиля температуры в карьере связано и изменение профиля относительной влажности. Поскольку в рамках настоящей задачи для индивидуальной частицы воздуха упругость водяного пара можно считать постоянной, ход

относительной влажности легко рассчитать по изменению упругости насыщения, определяемой температурой.

2. **Туман в карьере.** В ряде случаев сильное загрязнение воздуха в карьере связано с наличием тумана. Туман играет при этом, очевидно, двоякую роль. Во-первых, если туман наблюдается только в карьере, он является своеобразным индикатором устойчивого состояния атмосферы и загрязнения. Во-вторых, отражая коротковолновую солнечную и поглощая длинноволновую земную радиацию, туман уменьшает суточную изменчивость температуры, способствуя сохранению устойчивого состояния и накоплению загрязнений в карьере [7].

В самом деле, если интенсивность источников загрязнения такова, что предельно допустимая концентрация достигается в чаше карьера при слабом воздухообмене с окружающей средой за время около полусуток, то в условиях безоблачной погоды и без тумана опасного загрязнения карьера может не быть, несмотря на устойчивое инверсионное состояние атмосферы. Накопление загрязнений в карьере происходит только в темное время суток, тогда как с восходом солнца неравномерность нагрева склонов приводит к возникновению местных потоков и естественному выносу загрязнений из карьера. С появлением тумана картина качественно меняется. В дневное время слой тумана отражает большую часть солнечной радиации, препятствуя прогреванию склонов и дна карьера, разрушению инверсии и естественному воздухообмену. Сохраняя инверсию, туман сохраняет условия своего существования в чаше карьера даже в тех случаях, когда вне карьера туман не наблюдается. Круглосуточное существование тумана в карьере приводит к накоплению ото дня ко дню вредных примесей, пока не создадутся катастрофические условия или, наоборот, пока в результате смены воздушной массы и характера погоды не произойдет очищение карьера от тумана естественным путем.

Аналогичную роль может играть и облако взвешенной пыли в пространстве карьера. Избавиться от облака пыли можно, лишь выбросив загрязненный воздух за пределы карьера. В случае тумана затраты могут быть существенно меньше — следует лишь рассеять туман. Если рассеяние тумана осуществить в светлое время суток, например в утренние часы, то далее под действием солнечной радиации будет происходить процесс естественной вентиляции, рассмотренной выше.

В настоящее время задача рассеяния туманов может быть успешно решена лишь для сравнительно узкого диапазона температур (от -2 , -4 до -18 , -20°C) в условиях переохлажденных туманов. Большая энергия неустойчивости, запасенная переохлажденными каплями воды, позволяет получать положительный эффект рассеяния при внесении в туман гомеопатических доз реагентов, создающих ледяную фазу. При более низких температурах, как правило, наблюдаются ледяные туманы, рассеяние которых с помощью реагентов оказывается невозможным. «Теплые»

туманы также коллоидально устойчивы. Пока еще не найдены реагенты, позволяющие эффективно рассеивать туманы при положительных температурах.

В условиях карьеров, когда туман локализован в сравнительно небольшом пространстве, ограниченном твердыми стенками, рассеяние его может быть осуществлено не путем интенсификации конденсационно-коагуляционных процессов, а путем нагревания всего объема и испарения тумана. Для нагревания воздуха в этих условиях не требуются мощные тепловые источники: равномерное прогревание может быть достигнуто благодаря адиабатическим процессам, вступающим в действие при работе струйных вентиляционных установок.

3. Минимальный нагрев, необходимый для испарения тумана. Минимальное теоретически количество тепла $Q_{\min}$, необходимое для полного испарения тумана, складывается из затрат тепла на собственно испарение капель в объеме и на нагревание объема воздуха на $\Delta T_{\min}$ — от исходной температуры T_1 до температуры T_2 , при которой вся влага содержится в виде пара при 100 %-ной влажности.

$$Q_{\min} = c_p \rho_{\text{вх}} \Delta T_{\min} + Ls, \quad (4)$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха, $\rho_{\text{вх}}$ — плотность воздуха, L — теплота парообразования, s — водность тумана.

Величина $\Delta T_{\min} = T_2 - T_1$ может быть определена из условия баланса общего влагосодержания

$$q_1 + \Delta q + s = q_2, \quad (5)$$

где q_1 и q_2 — абсолютные влажности воздуха соответственно при температурах T_1 и T_2 , Δq — дополнительное количество водяного пара, выделяющегося при сгорании топлива.

Если калорийность топлива c , а количество водяного пара, выделяющегося при сгорании единичной массы топлива, ψ , то при нагревании единичного объема на $\Delta T_{\min}$ к нему поступает наряду с теплом дополнительная влага

$$\Delta q = c_p \rho_{\text{вх}} \Delta T_{\min} \cdot \frac{\psi}{c}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), переходя в (5) от абсолютной влажности к упругости водяного пара и ограничиваясь двумя членами разложения в ряд формулы Клапейрона-Клаузиуса, можно решить (5) относительно $\Delta T_{\min}$:

$$\Delta T_{\min} = \frac{s}{\frac{E_1}{T_1^3} \frac{L\mu^2}{(kN)^2} - c_p \rho_{\text{вх}} \frac{\psi}{c}}. \quad (7)$$

Здесь μ — молекулярный вес водяного пара, k — постоянная Больцмана, N — число Авогадро.

Или

$$\Delta T_{\min} = \frac{0,85 \cdot 10^{-6} \cdot s}{\frac{E_1}{T_1^3} - 1,1 \frac{\psi}{c}}, \quad (8)$$

если принять s в г/м^3 , E в мб, ψ в кг/кг , c в дж/кг .

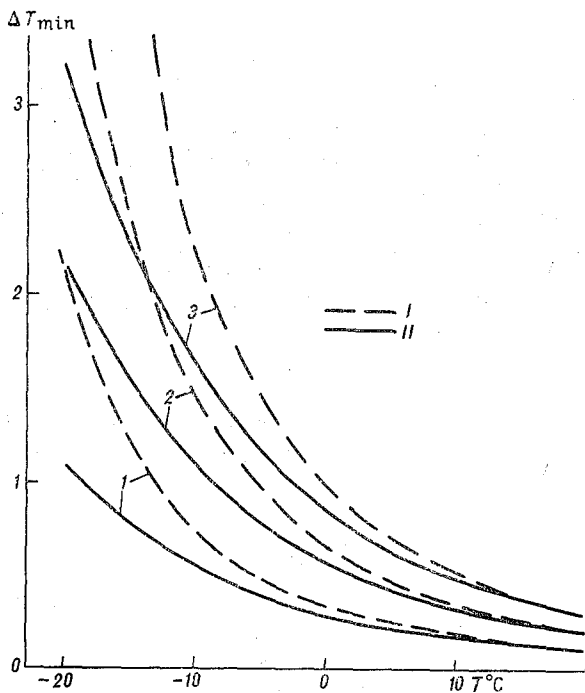


Рис. 3. Минимальный нагрев как функция исходной температуры тумана.

I — углеводородное, *II* — «идеальное» топливо, $s \psi = 1,4 \text{ кг/кг}$; 1, 2, 3 — соответственно для водностей тумана 0,1; 0,2; 0,3 г/м^3 .

В случае когда воздействие не связано с дополнительным выделением влаги («идеальное» топливо), как это наблюдается при адиабатическом нагревании опускающегося воздуха,

$$\Delta T_{\min} = \frac{s T_1^3}{E_1} \cdot \frac{1}{L} \left(\frac{kN}{\mu} \right)^2, \quad (9)$$

или

$$\Delta T_{\min} = 0,85 \cdot 10^{-6} \frac{s T_1^3}{E_1}. \quad (10)$$

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты расчетов $\Delta T_{\min}$ как функции температуры тумана при различных значениях

водности. Анализ результатов показывает, что существует довольно сильная зависимость минимального нагрева от температуры. Резкое увеличение $\Delta T_{\min}$ в области отрицательных температур свидетельствует об ограничении диапазона условий, в которых разумно пытаться рассеивать туман нагреванием. Более того, из формулы (7) видно, что при достижении некоторой критической температуры

$$T_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{EcL}{c\rho_{\text{вх}}\psi} \left(\frac{\mu}{kN}\right)^2} \quad (11)$$

рассеяние тумана путем сжигания углеводородного топлива становится вообще невозможным, независимо от исходной водности.

4. Испарение тумана в карьере при искусственной вентиляции. Для оценки скорости рассеяния тумана при работе струйной установки нужно рассчитать изменение температуры в карьере. На рис. 4 представлены результаты расчета изменения профиля температуры в карьере, заполненном туманом. Величина $\Delta T_{\min}$ составляет при заданных условиях $0,58^\circ\text{C}$. До тех пор пока температура опускающейся частицы воздуха не увеличится на $\Delta T_{\min}$, нагре-

вание идет с влажноадиабатическим градиентом, который при $T=273^\circ\text{C}$ и нормальном давлении составляет $\gamma_{\text{ва}}=0,66^\circ\text{C}/100\text{ м}$. Примерно через 700 сек. после включения двигателя у дна карьера отмечается $\Delta T_{\min}$, откуда и начинается испарение тумана. Довольно быстро нижняя граница тумана распространяется вверх. При этом возможны два варианта: туман находитися в исходный момент только в чаше карьера и туман наблюдается как в карьере, так и вне его.

В первом варианте на смену воздуху, выброшенному из карьера струей, сверху поступает воздух, свободный от тумана. Таким образом, толщина слоя тумана уменьшается как за счет опускания его верхней границы, так и за счет испарения его при повышении температуры. Примерно через 1400 сек. после начала работы двигателя обе эти границы смыкаются на высоте около 110 м над дном карьера. Туман в карьере исчезает. Как и следовало ожидать, время работы двигателя, необходимое для испарения тумана, оказалось существенно меньше, чем время полной замены воздуха во всем объеме карьера. Последнее при заданных параметрах

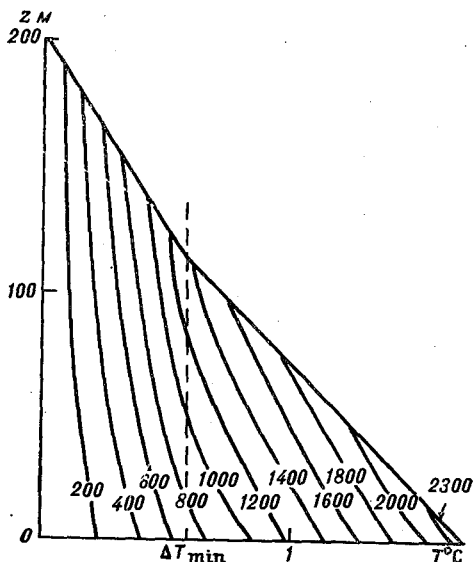


Рис. 4. Трансформация профиля температуры при наличии тумана.

Водность тумана $0,2\text{ г/м}^3$. Остальные параметры те же, что и для рис. 1.

струи и карьера, как это видно на рисунке, составляет около $\frac{2}{3}$ часа.

Во втором варианте туман непрерывно поступает в карьер из окружающей среды. Туман прогревается, опускаясь вниз, но испаряется он только в нижней части карьера, где прогрев превышает $\Delta T_{\min}$. Нижняя граница тумана поднимается теперь также через 1400 сек. на высоту 110 м, но далее, независимо от продолжительности работы двигателя, толщина слоя, свободного от тумана, не будет изменяться.

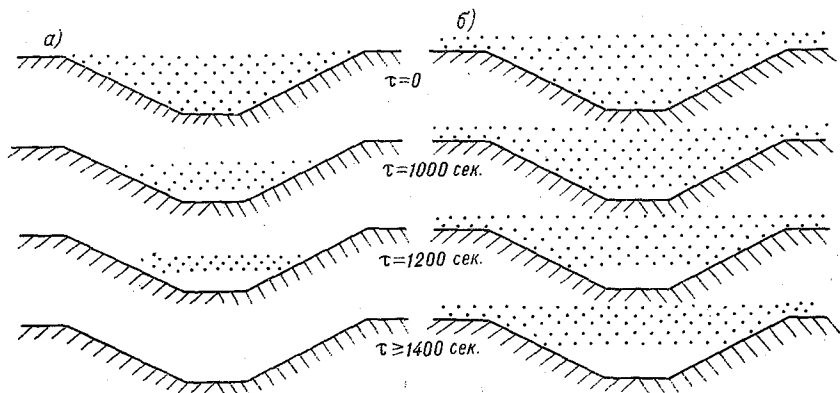


Рис. 5. Изменение толщины слоя тумана в карьере при работе струйной установки по результатам, представленным на рис. 4.

а — в исходный момент туман наблюдается только в чаше карьера, *б* — туман в карьере и вне его.

Стилизованные картинки распределения тумана в пространстве карьера для двух рассмотренных вариантов представлены на рис. 5.

5. Расчет дальности видимости при испарении тумана в карьере. Выше определялось время, необходимое для полного испарения тумана. Однако оптическая плотность тумана при нагревании уменьшается постепенно. Распространенной характеристикой прозрачности тумана является метеорологическая дальность видимости. Изменчивость метеорологической дальности видимости при искусственной вентиляции является удобной мерой эффективности воздействия.

Рассмотрим методику расчета дальности видимости в карьере при тумане. Воспользуемся для оценки дальности видимости формулой Траберта

$$L = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\varepsilon}, \quad (12)$$

где ε — порог контрастной чувствительности глаза, σ — поперечное сечение обратного рассеяния единицы объема воздуха.

В свою очередь для тумана

$$\sigma = \pi r^2 n F, \quad (13)$$

где n — концентрация капель в тумане, r — средний радиус капель, F — функция пропускания.

Переходя от средних размеров капель к водности тумана s и подставляя постоянные ($F \simeq 2$, $\varepsilon = 0,02$), после простых преобразований получим

$$L = 1,6 \cdot 10^{-4} n^{-1/3} s^{-2/3}, \quad (14)$$

где n в $1/\text{м}^3$, s в $\text{г}/\text{м}^3$, L в м.

Поскольку зависимость L от n в формуле (14) оказывается более слабой, чем от s , представляется возможным использовать среднее значение концентрации капель в тумане $n = 10^8 \text{ 1}/\text{м}^3$, при котором достигается хорошее соответствие выражения (14) известным эмпирическим формулам. Тогда

$$L = 35 \cdot s^{-2/3}. \quad (15)$$

Формула (15) позволяет перейти от измеренной до начала воздействия дальности видимости L_0 к исходной водности тумана

$$s_0 = \sqrt[3]{\left(\frac{35}{L_0}\right)^3}. \quad (16)$$

Зная s_0 , по формуле (10) можно определить $\Delta T_{\text{min}, 0}$. (Здесь индекс «0» относится к моменту начала воздействия.)

По мере нагревания тумана водность уменьшается. Теперь, используя те же соотношения, можно решить обратную задачу: если за время τ опускающийся объем тумана нагрелся на

$$\Delta T_\tau = \int_0^\tau W_{\text{ва}} d\tau, \quad (17)$$

то до полного испарения туман следует нагреть еще на величину

$$\Delta T_{\text{min}, \tau} = \Delta T_{\text{min}, 0} - \Delta T_\tau. \quad (18)$$

Соответственно на основании формулы (10) водность тумана в этот момент

$$s_\tau = \frac{\Delta T_{\text{min}, \tau} E_1}{0,85 \cdot 10^{-6} T_1^3}. \quad (19)$$

Вид формулы (15) свидетельствует о том, что при $s \rightarrow 0$ $L \rightarrow \infty$. В реальных условиях помутнение атмосферы обусловлено наличием не только тумана, но и взвешенной пыли. Об этом следует помнить при сравнении временных ходов рассчитанной и наблюдаемой дальности видимости. Для того чтобы рассчитанные значения не отличались в предельном случае от реальных, введем в расчет некоторую фиктивную фоновую водность — эквивалент ослабления прозрачности атмосферы взвешенными твердыми примесями.

Если, например, вне карьера без тумана фоновая видимость $L_{\Phi} \neq \infty$, то фиктивная фоновая водность может быть рассчитана по (16) как

$$s_{\Phi} = \left(\frac{35}{L_{\Phi}} \right)^{3/2}.$$

Теперь в качестве водности тумана следует задавать величину

$$s = s_{\epsilon} + s_{\Phi}. \quad (20)$$

При нагревании тумана испарение его происходит неравномерно по объему карьера, поэтому нужно уметь рассчитывать дальность видимости по заданному лучу визирования, проходящему через участки тумана разной водности и, следовательно, разной оптической плотности.

Для тумана переменной вдоль луча визирования водности $s = s(l)$ можно записать условие

$$\int_0^L s^{3/2} dl = 35. \quad (21)$$

Для практического определения L луч визирования нужно разбить на ряд участков Δl_i , в пределах которых водность меняется сравнительно мало, найти для каждого участка значение s_i и суммировать произведения $s_i^{3/2} \cdot \Delta l_i$, пока не будет достигнуто равенство

$$\sum_{i=1}^m s_i^{3/2} \Delta l_i = 35. \quad (22)$$

Тогда искомая величина метеорологической дальности видимости определяется как

$$L = \sum_{i=1}^m \Delta l_i. \quad (23)$$

На рис. 6 представлен пример расчета дальности видимости в карьере при искусственной вентиляции для варианта, изображенного на рис. 5 а. Луч визирования направлен с борта карьера по диагонали в противоположный нижний угол. Фоновая дальность видимости задана, $L_{\Phi} = 2000$ м.

6. Пример анализа экспериментов по использованию свободных струй для рассеяния туманов в карьере. В 1968—1970 гг. группой сотрудников Челябинского политехнического института на Коркинском угольном карьере испытывался метод искусственной вентиляции с помощью турбулентной неизотермической струи, соз-

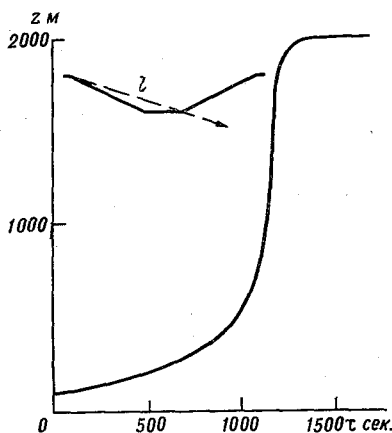


Рис. 6. Расчет наклонной дальности видимости в карьере для варианта, изображенного на рис. 5 а.

l — направление луча визирования.

даваемой специальным устройством — метеотроном. Целью этих опытов являлось рассеяние туманов, длительное существование которых в карьере связано с резким увеличением концентрации вредных примесей.

Метеотрон представляет собой систему из 50 горелок, в которых осуществляется сгорание низкосортного углеводородного топлива. Общий расход топлива около 6 кг/сек., что соответствует мощности тепловыделения $2,4 \cdot 10^8$ Вт. Горелки разнесены по некоторой площади таким образом, что на высоте, где факелы отдельных горелок смыкаются (20—25 м над землей), образуется единая конвективная струя радиусом около 30 м. Исходя из мощности тепловыделения и расчетов реакции сгорания топлива, можно предполагать на этой высоте вертикальную скорость в струе $\Delta T_0 = 1,5$ м/сек., а перегрев относительно окружающего воздуха $\Delta T_0 = 50^\circ \text{C}$. Эти параметры были взяты за исходные для расчета струи.

Ниже представлены результаты расчета секундной массы струи как функции высоты для одного из опытов (инверсионное распределение температуры $\gamma = -2^\circ \text{C}/100 \text{ м}$):

$z \text{ м} \dots$	0	20	60	100	140	180	220	260	300
$m \text{ т/сек.}$	4,74	6,37	11,22	17,20	24,30	32,10	40,00	49,50	59,50

Расчеты, как и выше, выполнены на основе теории струй [4].

Коркинский карьер представляет собой чашу неправильного овального сечения глубиной около 320 м и общим объемом примерно 600 млн. м³. Ниже для удобства расчетов карьер представлялся в виде перевернутого усеченного конуса (по объему равновеликого реальному карьере) с радиусом верхнего сечения 1400 м, нижнего 100 м и глубиной 300 м.

Забегая вперед, отметим, что время, необходимое для полной замены воздуха в объеме такого карьера струей заданных параметров, рассчитанное как

$$\tau = \int_0^H \frac{dz}{W} \quad (24)$$

(где H — глубина карьера), составляет 7,5 часа, причем только на замену воздуха в верхнем 200-метровом слое требуется 6 час. непрерывной работы струйной установки.

Время включения метеотрона в опытах составляло от 20 мин. до 1,5 часа.

Таким образом, в этих опытах не могло быть речи о сколь-нибудь значительном выбрасывании загрязненного воздуха из объема карьера, тем не менее в ряде случаев были получены существенно положительные результаты, заключающиеся в рассеянии тумана.

Рассмотрим два опыта, один из которых может служить примером определенно успешного воздействия, другой — примером, когда непосредственный эффект воздействия оказался несущественным.

Суточный ход температуры воздуха, скорости ветра и дальности видимости на борту (т. е. по данным метеостанции, расположенной вне карьера вблизи его борта) и на дне карьера для этих опытов представлен на рис. 7 и 8. Разности температур борт — дно до начала опытов были примерно одинаковые, в обоих случаях на борту карьера наблюдался небольшой ветер, на дне ветра не было. Для того и другого случая характерно резкое и существенное увеличение температуры на дне карьера во время работы метеотрона.

Однако если считать положительным результатом расселение тумана, т. е. резкое увеличение дальности видимости, в опыте 1 (19 февраля 1969 г.) этот результат был достигнут, а опыт 2 (9 января 1970 г.) оказался безуспешным. Правда, опыт 2 продолжался несколько меньше, а исходная плотность тумана была больше, но как показывает анализ, не эти обстоятельства определили резкое различие итогов опытов. Выше было показано, что с понижением температуры сильно увеличивается $\Delta T_{\min}$ — величина нагрева, необходимого для испарения тумана в объеме. Опыт 1 проведен при температуре воздуха, близкой к 0°C , а опыт 2 — при температуре, значительно более низкой.

Переходя от значений дальности видимости к водности тумана, получим для опыта 1 перед воздействием $s_0 = 0,053 \text{ г/м}^3$, что соответствует $\Delta T_{\min, 0, \text{ борт}} = 0,15^\circ\text{C}$ и $\Delta T_{\min, 0, \text{ дно}} = 0,19^\circ\text{C}$. Те же величины для опыта 2 составляют: $s_0 = 0,21 \text{ г/м}^3$; $\Delta T_{\min, 0, \text{ борт}} = 1,57^\circ\text{C}$ и $\Delta T_{\min, 0, \text{ дно}} = 1,95^\circ\text{C}$. (При этом предполагалось, что дальность видимости и водность постоянны по высоте карьера.)

Для того чтобы объем тумана нагрелся на величину $\Delta T_{\min, 0}$ в первом случае он должен был опуститься на 25—30 м, во втором — на 200—250 м. В соответствии с расчетами профилей температуры в опыте 1 туман испарился на дне карьера уже через 7—8 мин., а полностью во всем карьере через 50 мин. после начала воздействия. В опыте 2 туман испарялся слишком медленно, за время опыта оптическая плотность тумана практически не изменилась. Как показывают расчеты, для полного испарения тумана в опыте 2 установка должна работать около 5,5 часа. За это время, как отмечено выше, осуществляется смена воздуха в большей части объема карьера.

Степень соответствия расчета эксперименту показана на рис. 9. Сюда перенесены с рис. 7 и 8 кривые хода температуры и дальности видимости непосредственно во время опыта (с небольшими интервалами до и после), здесь же приведены расчетные кривые изменения температуры воздуха на дне карьера и дальности видимости.

На рис. 7 и 8 дальность видимости дается на дне карьера. Мы не располагаем точными сведениями относительно расположения объектов для определения дальности видимости, но, очевидно, в условиях ограниченного пространства речь идет скорее о наклонной дальности видимости, чем о горизонтальной. Поэтому

на рис. 9 приведены расчеты наклонной дальности видимости, более полно характеризующей оптическую плотность тумана по всему карьеру. Расчеты выполнены для фиксированного луча

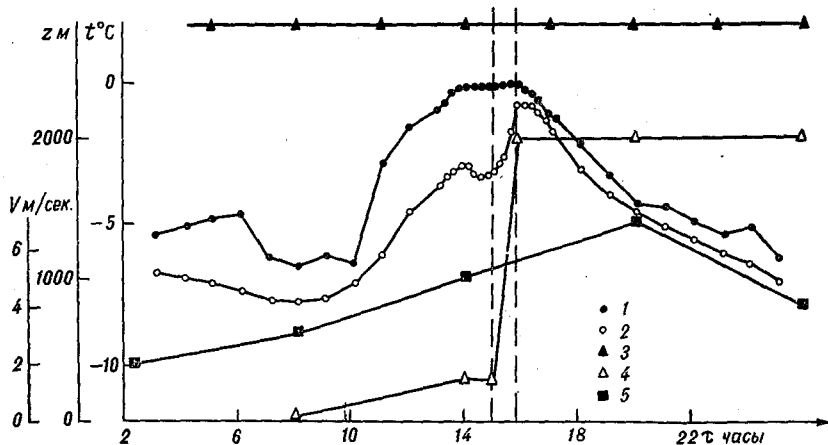


Рис. 7. Суточный ход метеозементов в Коркинском карьере 19 II 1969 г. 1, 2 и 3, 4 — соответственно температура и дальность видимости на борту и дне карьера, 5 — скорость ветра на борту. На дне карьера штиль. Начало воздействия 15 час., продолжительность воздействия 55 мин.

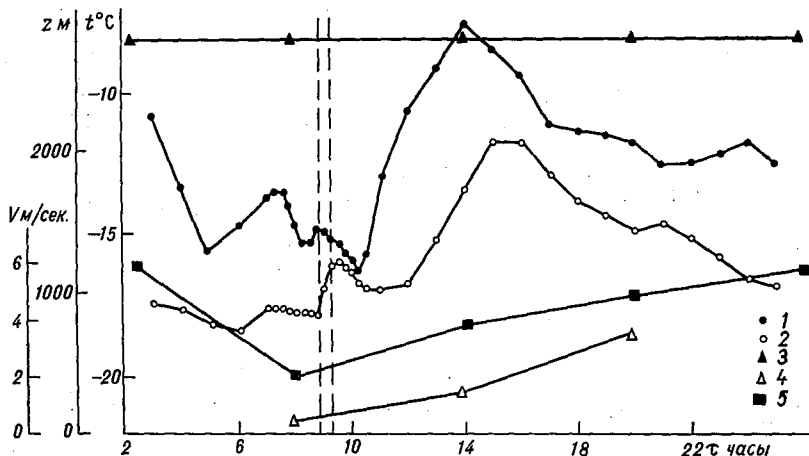


Рис. 8. Суточный ход метеозементов в Коркинском карьере 9 I 1970 г. Усл. обозначения см. рис. 7. Начало воздействия примерно 8 час. 45 мин. Продолжительность воздействия 32 мин.

визирования, направленного с борта карьера в противоположный угол у дна. В качестве фоновой дальности видимости принято ее значение вне карьера (на борту).

Сравнивая рассчитанные и экспериментальные значения, можно отметить их вполне удовлетворительное соответствие друг

другу. При этом следует иметь в виду, что, кроме отмеченных уже допущений, принятых в расчетах, таких, как задание правильной формы карьера, предположения об отсутствии вертикального перемешивания, о неопределенности в выборе направления луча визирования, существенное значение может иметь нелинейность действительных профилей температуры и дальности видимости до воздействия.

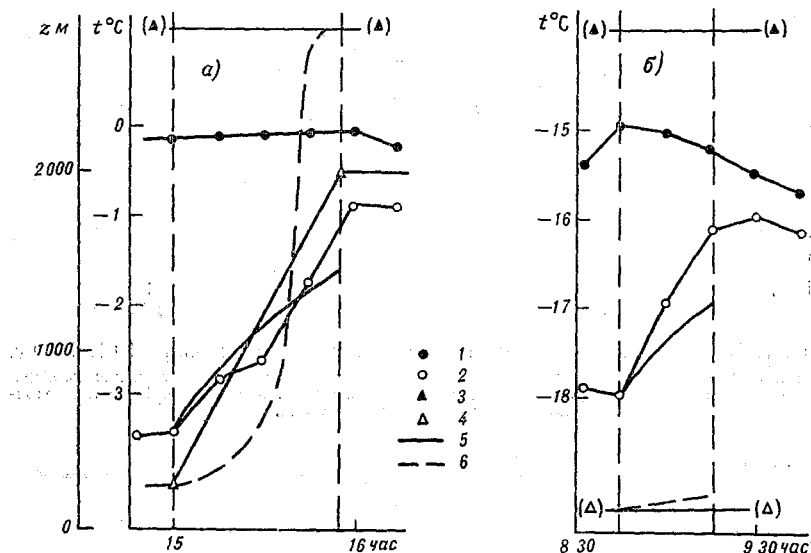


Рис. 9. Сравнение расчета с экспериментом.

a — опыт 1 (19 II 1969 г.), *б* — опыт 2 (9 I 1970 г.); 1—4 — эксперимент — то же, что на рис. 7 и 8; 5 — расчет хода температуры на дне карьера, 6 — расчет изменения наклонной дальности видимости в карьере во время опытов.

В целом анализ опытов позволяет надеяться, что, имея достаточно полные сведения о распределении метеоэлементов, можно с помощью развитой выше методики с большой степенью определенности предвычислять результаты опытов по искусственной вентиляции карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочнев К. В. Очередные задачи научных исследований по вентиляции горнорудных шахт и карьеров. — Труды института горного дела, 1964, вып. 10.
2. Бухман Я. З., Бел'яев С. В. Возможность искусственного проветривания карьеров с помощью реактивных двигателей. — «Цветная металлургия», 1965, № 23.
3. Филатов С. С., Вершинин А. А. Искусственное проветривание глубоких карьеров свободными струями. — Труды института горного дела, 1964, вып. 10.

4. Бекряев В. И. Турбулентная неизотермическая струя в стратифицированной атмосфере. — Труды ЛГМИ, 1972, вып. 45.
5. Качурин Л. Г., Бекряев В. И., Дыдина Г. П. Траектории турбулентных нагретых затопленных струй в атмосфере. — Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1964, № 12.
6. Бухман Я. З., Бекряев В. И. Расчет распространения турбулентных струй при проветривании глубоких рудных карьеров. — Сб. работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 10.
7. Метеорология и атомная энергия. Пер. с англ. под ред. Федорова Е. К. М., ИЛ, 1959.

РАСЧЕТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ ПУТЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВОЗДУХА В КАРЬЕРАХ

Как показано в работах [1, 2], время искусственного проветривания карьера существенно зависит не только от параметров струи, образуемой вентиляционной установкой, термодинамической устойчивости воздуха и геометрии карьера, но и от вертикального профиля концентрации загрязнения. До настоящего времени в литературе отсутствуют сведения об экспериментальных профилях загрязнения в карьерах, а также не установлены количественные связи между интенсивностью источников загрязнения, метеоусловиями и накоплением вредностей в карьерном пространстве.

В связи с этим в настоящей работе дается способ приближенной теоретической оценки этих связей и приводятся примеры расчетов.

Результаты расчетов сопоставляются с измерениями концентраций акролеина на различных по высоте уступах Сибайского карьера.

Кроме того, в работе приводится методика расчета минимальной высоты слоя, до которой необходимо полностью перемешивать воздух, чтобы снизить уровень концентрации загрязнения при известной геометрии карьера и начальном вертикальном профиле концентрации загрязнения.

1. Для оценки вероятного профиля концентрации загрязнения при заданной интенсивности источника воспользуемся решением для мгновенного плоского источника, которое, как известно [3], может быть записано в виде

$$c(z, \tau) = \frac{g}{\sqrt{4\pi k\tau}} e^{-\frac{(z-z')^2}{4k\tau}} \quad (1)$$

Проинтегрируем это выражение по времени от 0 до τ , полагая $g = Qd\tau$,

$$c'(z, \tau) = \frac{Q}{\sqrt{4\pi k}} \int_0^\tau \frac{e^{-\frac{(z-z')^2}{4k\tau}}}{\sqrt{\tau}} d\tau, \quad (2)$$

где $c'(z, \tau)$ — концентрация загрязнения (мг/м^3), k — вертикальный коэффициент турбулентности ($\text{м}^2/\text{сек.}$), z' — высота источника над поверхностью земли, τ — время, Q — интенсивность источника ($\text{мг/м}^2 \cdot \text{сек.}$).

Обозначив $\frac{Q}{\sqrt{4\pi k}} = A$, $\frac{(z-z')^2}{4k} = a$, введя новую переменную $\frac{1}{\tau} = y^2$ и выполнив интегрирование, найдем, что при $c'(z, \tau)|_{\tau=0} = 0$

$$c'(z, \tau) = \frac{Q}{\sqrt{\pi k}} \left\{ \sqrt{\tau} e^{-\frac{(z-z')^2}{4k\tau}} - \frac{z-z'}{2} \sqrt{\frac{\pi}{k}} \left[1 - \Phi\left(\frac{z-z'}{\sqrt{2k\tau}}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

Здесь $\Phi\left(\frac{z-z'}{\sqrt{2k\tau}}\right)$ — интеграл вероятности.

Задав Q и k , можно найти $c'(z, \tau)$. Рассчитанные таким способом значения будут отличаться от реальных, которые должны быть в замкнутом пространстве карьера. Исходя из физических соображений, можно считать, что реальные значения должны быстрее убывать с высотой, так как чаще всего $k(z)$ — возрастающая функция для пограничного слоя. С другой стороны, так как реальные источники (например, движущиеся автосамосвалы) рассредоточены на разных уровнях, значения $c(z, \tau)$ должны медленнее убывать с высотой. Из этого следует, что основные неучтенные факторы влияют противоположно.

Для расчетов воспользуемся измерениями в Сибайском карьере. По данным Я. З. Бухмана [4], можно принять, что выделение акролеина составляет $Q = 0,0351 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{сек.}$

Найденные нами величины коэффициента турбулентности на основании базисных шаропилотных наблюдений за свободными и уравновешенными шарами в Сибайском карьере летом 1970 г. в предрассветные часы, а также результаты измерений коэффициента турбулентности в Коркинском карьере [5] свидетельствуют, что он изменяется от 0,1 до 40–50 $\text{м}^2/\text{сек.}$ При этом малые значения k соответствуют устойчивому термическому состоянию и очень слабому ветру в карьере, а большие — неустойчивому состоянию и умеренному ветру. Результаты расчетов значения концентрации c мг/м^3 на $z = 1 \text{ м}$ над дном карьера приведены в табл. 1. Для расчетов были взяты коэффициенты турбулентности, равные 0,1; 1,0; 10,0 и 50,0 $\text{м}^2/\text{сек.}$

Если принять ПДК равной 2 мг/м^3 , или $0,0008\%$ по объему, из табл. 1 следует, что при $k \leq 0,1 \text{ м}^2/\text{сек.}$ концентрация загрязнения может достичь ПДК примерно через 12 мин., 2 ПДК через 36 мин., 3 ПДК через 150 мин. Для превышения уровня ПДК при $k \sim 1 \text{ м}^2/\text{сек.}$ k_z должен сохраняться меньше $1 \text{ м}^2/\text{сек.}$ в течение 4,5 часа, при $k > 1 \text{ м}^2/\text{сек.}$ время достижения концентрации загрязнения значения, равного ПДК, существенно увеличивается.

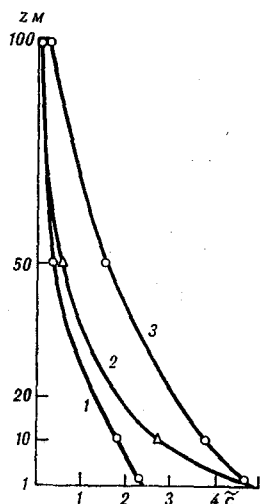


Таблица 1

τ мин.	$k \text{ м}^2/\text{сек.}$			
	0,1	1,0	10,0	50,0
1	0,319	0,105	0,032	0,014
10	1,370	0,432	0,137	0,061
100	4,840	1,475	0,469	0,210
360	9,220	2,858	0,906	0,406
435	20,0	—	—	—

Рис. 1. Вертикальные профили безразмерной концентрации акролеина в карьере.

1) $\tau = 600 \text{ сек.}$, 2) значения τ по измерениям, 3) $\tau = 21\,600 \text{ сек.}$

Для сравнения с реальными значениями концентрации на рис. 1 приведены кривые безразмерных значений $c = c/c_0$ при $k = 0,1 \text{ м}^2/\text{сек.}$ и $\tau = 6 \text{ час.}$, средние по восьми измерениям в Сибайском карьере (по данным Я. З. Вухмана). Они показывают удовлетворительную сходимость результатов измерений и расчетов.

2. При большой устойчивости воздуха (γ равно от -2 до $-6^\circ \text{C}/100 \text{ м}$) и больших глубинах карьеров ($H \geq 150 \div 200 \text{ м}$) турбулентные струи, создаваемые реально существующими установками для искусственного проветривания, не выходят за пределы карьера.

В этом случае можно предположить, что, меняя положение установки на нижних уступах, можно добиться полного перемешивания воздуха внутри карьера до некой высоты. Возникает необходимость оценить, до какой высоты необходимо полностью перемешать воздух, чтобы концентрация загрязняющих веществ (газов) снизилась до заданного значения. Следует считать, что в первом приближении эта высота зависит от вертикального профиля загрязнения в карьере $c'(z, \tau)|_{\tau=0} = c_0(z, 0)$ и геометрии карьера, т. е. от изменения его объема с высотой $V(z)$. Если полное перемешивание с помощью струй (одной или нескольких) может быть достигнуто и если время восстановления начального профиля (при неизменных метеоусловиях и стационарных источ-

никах) много меньше времени перемешивания, то такой способ уменьшения концентрации вредных до ПДК может быть использован.

Возможность применения такого способа будет зависеть от высоты слоя, т. е. от объема, в котором следует перемешать воздух. Для того чтобы оценить объем слоя перемешивания, найдем высоту $H_{\min}$, до которой надо полностью перемешать воздух, чтобы снизить уровень загрязнений. Пренебрегая действием источников за время перемешивания, будем исходить из постоянства массы загрязняющих веществ. Тогда можно записать, что

$$M = \int_0^z c(z) \frac{\partial V}{\partial z} dz = \text{const}, \quad (4)$$

где M — масса загрязняющего газа, V — объем карьера.

На основании (4) можно записать

$$\int_0^{z_{\min}} \frac{\partial V}{\partial z} c_0(z) dz = \int_0^{z_{\min}} \frac{\partial V}{\partial z} c_{\min}(z) dz. \quad (5)$$

Для каждого рассматриваемого карьера необходимо знать функции $c_0(z)$, $V(z)$ и $c_{\min}(z)$. Тогда можно найти $z_{\min}$, проинтегрировав уравнение (5).

Так как практически нас интересует снижение уровня загрязнения до ПДК, предположим, что $c_{\min}(z) = \text{ПДК}$ или заданному значению c_{00} . Тогда уравнение (5) примет вид

$$\int_0^{z_{\min}} \frac{\partial V}{\partial z} c_0(z) dz = \text{ПДК} \cdot V_{z_{\min}}. \quad (6)$$

Приведем пример расчета по формуле (6) применительно к геометрии Сибайского карьера. Изменение рассматриваемой части объема Сибайского карьера с высотой можно аппроксимировать степенной зависимостью

$$V = az^b, \quad (7)$$

где a и b находятся эмпирически.

Если $c_0(z)$ также задать в виде степенной функции

$$c_0(z) = \alpha z^{-\beta} \quad (8)$$

и подставить (7) и (8) в (5), получим

$$\int_0^{z_{\min}} \alpha z^{-\beta} d(az^b) = \text{ПДК} \int_0^{z_{\min}} d(az^b), \quad (9)$$

откуда

$$z_{\min} = \left[\frac{ab}{(b-\beta) \text{ПДК}} \right]^{\frac{1}{\beta}}. \quad (10)$$

Для Сибайского карьера $a=0,693 \cdot 10^4$, $b=1,84$.

Для определения $z_{\min}$ воспользуемся профилем концентрации, приведенным на рис. 1. Этот профиль может быть аппроксимирован следующим выражением:

$$\tilde{c} = \frac{c}{\text{ПДК}} = 6,3z^{-0,7}, \quad (11)$$

т. е. $\alpha=6,3$, $\beta=0,7$.

В формуле (11) c — безразмерная концентрация. Используя (9), найдем, что $z_{\min}=28$ м. Для случая, когда концентрация загрязнения очень медленно убывает с высотой

$$\tilde{c} = \frac{c}{\text{ПДК}} = 15,0z^{-0,5}, \quad z_{\min} = 425 \text{ м.} \quad (12)$$

Эти примеры показывают, что в первом случае, когда $z_{\min}=28$ м, что соответствует объему Сибайского карьера, равному примерно 3,5 млн. м³, практически целесообразно рассматривать способы снижения уровня загрязнения с помощью перемешивания.

Во втором случае такие способы исключаются.

Полученные значения $H_{\min}$, а также относительно большое время, которое требуется, чтобы концентрация загрязняющих веществ превысила ПДК, показывают возможность использования перемешивания для уменьшения концентрации загрязнения до санитарно-гигиенических норм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Л. А. Учет влияния распределения примесей на эффективность искусственного проветривания карьеров. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
2. Казаков Л. А., Бухман Я. З. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по микроклимату карьеров. Л., изд. ГГО им. А. И. Воейкова, 1971.
3. Сеттон О. Г. Микроклиматология. Л., Гидрометеиздат, 1958.
4. Бухман Я. З. Санитарно-гигиеническая характеристика воздушных бассейнов цветной металлургии. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 10.
5. Воронцов П. А., Курнаков Т. А., Честная И. И. Структура воздушного потока в Коркинском карьере в дневные часы. — Труды ГГО, 1970, вып. 270.
6. Бухман Я. З., Бекряев В. И. Расчет распространения турбулентных струй при проветривании глубоких рудных карьеров. — Сборник работ Свердловской ГМО, 1970, вып. 10.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ КАРЬЕРОВ

Проблема создания и поддержания нормальных санитарно-гигиенических условий труда в карьерах требует комплексного решения целого ряда инженерно-технических задач, одной из которых является изучение особенностей микроклимата в пределах карьерного пространства, выявление наиболее устойчивых корреляционных связей метеоэлементов и условий нарушения воздухообмена в карьерах. Это необходимо для разработки методов прогнозов и принятия мер по ликвидации опасных метеорологических явлений.

Отечественная промышленность выпускает весьма разнообразные метеорологические приборы [1, 2], которые предназначены в основном для сети Гидрометслужбы СССР. Специфика открытых горных работ (применение мощной горнодобывающей техники, ежедневные массовые взрывы, повышенная загазованность и запыленность карьерного пространства, постоянное понижение при большой подвижности общего фронта горных работ) предъявляет повышенные требования к условиям эксплуатации приборов, что вызывает необходимость более часто контролировать исправность измерительного комплекса, увеличить частоту профилактических осмотров и оперативного ремонта. Поэтому некоторые из них, хорошо зарекомендовавшие себя на Гидрометеосети, в условиях карьеров оказались непригодными. Необходимо иметь оперативную метеорологическую информацию о параметрах микроклимата в различных зонах карьера требует наличия дистанционных и автоматических приборов и систем, что позволяет существенным образом увеличить точность измерений и исключить элементы субъективизма, а также значительно сократить необходимый штат наблюдателей.

Однако в наличии таких приборов мало, поэтому в процессе исследований нами были разработаны некоторые дистанционные измерительные системы, в частности, для термоветрового зондирования вертикальной структуры воздушных потоков в пределах карьерного пространства [3, 4].

Опорными пунктами при исследовании в карьерах выбирались две метеорологические площадки: поверхность и дно карьера, оборудованные в соответствии с Наставлениями [5]. Если на дне карьера по причине непрерывности технологического цикла оборудовать стационарными приборами такую площадку не представлялось возможным, измерения проводились походными приборами. Для более детального исследования микроклимата карьера производились маршрутные съемки суточного цикла, где использовались метеорологические приборы также походного типа.

При исследовании параметров микроклимата фиксировались следующие величины: скорость и направление воздушных потоков, температура и влажность воздуха, температура поверхности почвы и распределение температур в почве по глубине, элементы радиационного режима и продолжительность солнечного сияния, вертикальная структура воздушных потоков и атмосферное давление.

Измерение ветровых характеристик производилось с помощью различных приборов, из которых в первую очередь следует назвать электромеханический самописец ветра М-12, метеорологическую станцию М-49, контактные анемометры М-25 и ручные чашечные анемометры МС-13.

Кроме того, были предприняты попытки использовать в условиях карьера для измерений параметров ветра анеморумбограф М-64. Отмечая большие возможности данного прибора (одновременное измерение с записью на ленту средней и мгновенной скоростей, а также направления в системе прямоугольных координат), необходимо подчеркнуть некоторую сложность и конструктивную недоработку отдельных узлов, что требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Опыт применения двух приборов М-64 в условиях карьера Аксай показал также, что очень часто ненадежно работает в целом узел записи: высыхают чернила, засоряются перья, чистка и промывка которых в предложенной конструкции довольно сложны. Поэтому эксплуатация таких приборов в условиях карьеров крайне затруднительна. Анеморумбографы модели М-64 не могут быть рекомендованы для широкого внедрения при микроклиматических исследованиях в карьерах.

Определение скорости и направления ветра по флюгеру в условиях карьеров оказалось неприемлемым, как в связи с малой надежностью и субъективизмом отсчета показаний, так и из-за особенностей технологического процесса добычи полезного ископаемого (трудно подходить к прибору для снятия показаний, интенсивное движение транспорта, взрывы, повышенная запыленность и загазованность и т. п.).

Ручные чашечные анемометры типа МС-13, как правило, применялись для определения средней скорости ветрового потока в срочные часы при исследовании ветра в рабочей зоне на высоте 2 м. Простота эксплуатации и надежность анемометров МС-13 делают их незаменимыми при ветровом исследовании ра-

бочих зон карьеров. При эксплуатации ручных анемометров периодически производилась их контрольная тарировка. С этой целью использовалась малогабаритная установка для поверки ручных анемометров типа УПАР-01, обеспечивающая диапазон скоростей 0,8—20,0 м/сек.

При проведении экспедиционных исследований широко применялись контактные анемометры М-25, которые позволяли осуществлять дистанционные измерения скорости ветра в диапазоне 0,8—30,0 м/сек. Для фиксации результатов использовались импульсные счетчики СБ-1М/100 или регистраторы, осуществляющие запись импульсов на бумаге.

Для оперативной работы на диспетчерском пункте применялась дистанционная метеорологическая станция типа М-49. Существенное достоинство этой станции на карьерах — возможность дистанционных измерений в любое время. Устанавливались такие приборы, как правило, на мачтах, на высотах, сравнимых с высотами уступов.

Опыт многолетней работы в условиях карьеров показал, что наиболее удобными в эксплуатации являются приборы, которые позволяют производить дистанционные измерения с записью соответствующих показаний. При исследовании ветровых характеристик к таким приборам следует отнести дистанционный электромеханический самописец ветра М-12, который производит измерения с записью на ленте средней за 10 мин. скорости в диапазоне 1,0—40,0 м/сек. и направления по 16 румбам. Опыт длительной эксплуатации приборов М-12 в условиях карьеров свидетельствует о высокой надежности и безотказности их при работе практически в любых погодных условиях, в том числе и при повышенной запыленности.

Для измерения температуры и влажности воздуха использовались стеклянные метеорологические термометры и металлические термометры сопротивления (метеостанция М-49), а также самописцы — термографы и гигрографы. В экспедиционных условиях применялись аспирационные психрометры. При стационарных измерениях температура и влажность воздуха определялись по станционному психрометру, установленному в психрометрической будке. Здесь же помещались метеорологические максимальный и минимальный термометры. Рядом с психрометрической будкой размещалась будка для самописцев, которые фиксировали суточный ход температуры (термограф) и влажности (гигрограф) воздуха.

В условиях карьеров наиболее часто отмечались неисправности и отказы приборов из-за большой запыленности, действия взрывов и интенсивного перемещения транспорта. Поэтому метеорологические будки располагались в удаленных от забойных участков местах, а в период эксплуатации регулярно проводилась чистка всех приборов от пыли.

При исследовании параметров микроклимата в карьерах большое значение имеет радиационный режим, основными элементами

которого являются прямая, рассеянная, суммарная и отраженная радиации и радиационный баланс. Широко применяемые на сети Гидрометслужбы термоэлектрические приборы хорошо зарекомендовали себя и при наблюдениях в карьерах. Для измерения интенсивности рассеянной, суммарной и отраженной коротковолновой ($\lambda=0,3\div 2,4$ мкм) радиаций использовались пиранометры типа П-3×3 или универсальные типа М-80, которые работали в паре со стрелочными гальванометрами ГСА-1. В стационарных условиях интенсивность солнечной радиации измерялась альбедометрами типа АС-3×3, при экспедиционных исследованиях использовались походные альбедометры типа АП-3×3.

Для измерения радиационного баланса применялись термоэлектрические балансомеры М-10 в паре с гальванометрами ГСА-1. Все актинометрические приборы устанавливались на специальной стойке типа М-13, которая позволяла проводить необходимые измерения.

Для получения суммарных характеристик составляющих солнечной радиации за какие-либо определенные интервалы времени (часы, сутки, месяцы и т. п.) в качестве регистратора к термоэлектрическим датчикам применялись электролитические интеграторы типа Х-603, выпускаемые Ленинградским электромеханическим заводом.

Продолжительность солнечного сияния определялась с помощью гелиографа универсальной модели (ГУ), который устанавливался на столбе, на открытой площадке, на высоте 2 м.

Для повышения точности наблюдений по актинометрическим приборам систематически производилась проверка переводных множителей в естественных условиях. В качестве контрольного прибора использовался термоэлектрический актинометр в паре с гальванометром ГСА-1, специально поверенный как «контрольный».

Микроклиматические характеристики в пределах карьерного пространства в существенной мере зависят от условий тепло- и массообмена на раздѣле почва—воздух. Поэтому для выявления особенностей теплового поля почвы производились геотермические исследования, которые включали измерение температуры поверхности почвы и изменение температуры горных пород с глубиной. Наиболее удобными в работе были приборы, имевшие в качестве чувствительных элементов металлические или полупроводниковые термометры сопротивления. Температура поверхности почвы дополнительно контролировалась с помощью стеклянных термометров ТМ-3. В процессе эксплуатации термометров ТМ-3 в карьерах неоднократно отмечались случаи их механических повреждений, особенно при взрывах, при погрузке полезного ископаемого и движения транспорта. Поэтому применять стеклянные термометры можно рекомендовать лишь на поверхностной площадке, а на дне карьера их использование может быть оправдано только при разовых измерениях.

Для дистанционного измерения температуры поверхностного слоя почвы применялись электрические термометры АМ-2М, ЭПТ и М-54. У приборов АМ-2М датчиками являются медные проволочные термометры сопротивления, заключенные в защитные кожухи. Такие приборы позволяют измерять температуру почвы от -30 до 45°C , но имеют значительную погрешность измерения ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) и весьма малую дистанционность (2 м). Поэтому приборы АМ-2М можно рекомендовать только для приближенных измерений температуры горных пород в экспедиционных условиях. Почвенные полупроводниковые точечные электротермометры типа ЭПТ, выпускаемые Экспериментальными мастерскими Агрофизического института ВАСХНИЛ, состоят из комплекта 10 датчиков на полупроводниковых термосопротивлениях ММТ-4. Погрешность измерения температуры от -20 до 40°C составляет $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. Датчики размещались в скважинах или траншеях, измерительный пульт находился непосредственно в районе измерения. Длительная эксплуатация электротермометра ЭПТ показала, что прибор работает устойчиво, надежно. Контрольные тарировки чувствительных элементов подтвердили, что погрешность всех датчиков не превышала паспортного значения.

Наиболее удачной по конструкции и сравнительно высокой точности измерения является установка для дистанционного измерения температуры почвы типа М-54 [6]. В качестве чувствительных элементов в ней используются медные термометры сопротивления. Прибор имеет 10 датчиков, которые с помощью кабеля длиной 120 м и более монтируются в требуемых точках. Пределы измерения температуры от -35 до 55°C , погрешность измерения не более $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

В стационарных условиях регистрирующие приборы М-54 были размещены в помещениях полевой лаборатории, на расстоянии около 300 м от измерительных скважин. При эксплуатации приборов в течение более двух лет было отмечено, что приборы работают надежно, обеспечивая высокую точность измерения. Наблюдаемые неполадки в системе относились в основном к датчикам. Это в первую очередь нарушения герметизации самого датчика или кабеля, механические повреждения и обрывы электрических цепей.

Неоднократно проводившиеся контрольные тарировки всех датчиков показали высокую стабильность их параметров при отсутствии механических повреждений и нарушении герметизации. Показания регистратора при контрольных тарировках не превышали величины погрешности измерения. Это позволяет рекомендовать установку М-54 для дистанционного измерения температуры почвы в карьерах как в стационарных, так и в экспедиционных условиях.

Кроме исследований на основных площадках дно — поверхность карьера, проводились измерения вертикальной структуры воздушного потока в пределах карьерного пространства и на его поверхности. Для этого использовались дистанционные системы,

разработанные и изготовленные в Институте биофизики МЗ СССР [3, 4], термоградиентограф (ТГГ) и блок контактных анеометров (БКА). Термоградиентограф позволяет измерять с погрешностью не более $\pm 0,1^\circ\text{C}$ разность температур между слоями воздуха относительно опорного слоя на высоте 2 м. Термозондирование проводилось в слое от дна до высоты около 20 м над поверхностью карьера. Вторым прибор производил аналогичные измерения разностей температуры в слое 20 м относительно своего опорного слоя на высоте 2 м на площадке поверхности. Датчики размещались на поверхности карьера на мачте, а в пределах карьерного пространства они крепились на несущем тросе, который поднимался с помощью другого троса, перекинутого через карьер и закрепленного на мачтах, установленных на поверхности карьера, с помощью ручной лебедки. Аналогичным образом с помощью кронштейнов крепились чувствительные элементы БКА, которые представляют собой модернизированные ветроприемники контактных анеометров М-25. Регистратор БКА представляет собой систему электромагнитных счетчиков импульсов типа СБ-1М/100.

Данные приборы эксплуатировались в производственных условиях более двух лет; они обладают высокой надежностью и достаточной точностью, весьма просты в эксплуатации, обеспечивают быстрый съем информации, позволяют производить дистанционно термоветровое зондирование в пределах карьерного пространства.

Для непрерывной регистрации изменения атмосферного давления применялся барограф метеорологический недельного хода М-22Н. Прибор устанавливался в помещении полевой лаборатории в соответствии с Наставлением [5]. Для экспедиционных измерений использовался метеорологический барометр-анероид типа БАММ.

Измерения на карьерных метеостанциях проводились в срочные часы (8 раз в сутки) по местному времени.

Таким образом, накопленный опыт и проведенный анализ результатов работы применяемого комплекса измерительных приборов при микроклиматических исследованиях в карьерах показали, что значительная часть таких исследований может быть проведена с помощью приборов, выпускаемых промышленностью для метеорологической сети, однако некоторые специальные исследования требуют разработки нестандартной аппаратуры.

Для широкого применения в условиях карьеров наиболее перспективными являются комплексные дистанционные автоматические измерительные системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по поверке метеорологических приборов. Л., Гидрометеониздат, 1967.
2. Стернзат М. С., Сапожников А. А. Метеорологические приборы, наблюдения и их обработка. Л., Гидрометеониздат, 1959.

3. Иванов И. И., Хирви В. А. Термоградиентограф для производственных наблюдений в карьерах. — «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1971, № 5.
4. Иванов И. И., Хирви В. А. Приборы вертикального зондирования атмосферы карьеров. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л., Гидрометеиздат, 1969.
6. Беспалов Д. П. Дистанционная установка для измерения температуры почвы. — Труды ГГО, 1960, вып. 103.

ВЛИЯНИЕ ПРИТОКА ВЛАГИ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТУМАНОВ В КОРКИНСКОМ КАРЬЕРЕ

Немаловажная роль в образовании туманов при низких температурах принадлежит водяному пару, содержащемуся в большом количестве в продуктах сгорания. При этом наблюдается приращение точки росы (T_d), величина которой зависит от температуры воздуха, вида и количества сжигаемого топлива. Учет приращения T_d следует проводить особенно в тех случаях, когда у поверхности земли отмечается штиль, а в слое до 300 м скорость ветра составляет 1—3 м/сек.

В пределах Коркинского карьера основной вид топлива — бурый уголь. Весовое количество водяного пара, образующегося при сгорании 1 кг топлива, зависит от его вида (табл. 1).

Таблица 1
Весовое количество водяного
пара, образующегося при
сжигании 1 кг различных видов
топлива

Вид топлива	Вес водяного пара (г/кг)
Природный газ (метан)	2160
Бензин	1305
Торф	637
Дрова	632
Бурый уголь	458
Каменноугольный кокс	60

Величину поступления водяного пара в единицу объема (δ_a), выраженную в г/м³, можно вычислить по формуле [1]

$$\delta_a = \frac{WQ}{24 \cdot 10^3 S h} \tau, \quad (1)$$

где W — весовое количество водяного пара (г/кг), образующееся при сжигании 1 кг топлива (табл. 1); Q — вес сжигаемого топлива (в кг/24 часа), S — площадь района, в пределах которого сжигается топливо

(км²), h — толщина слоя распространения водяного пара от сгорания топлива (м), τ — время (часы), в течение которого сжигается топливо.

Формула (1) принимается в условиях застоя воздуха в слое 50—100 м. В тех случаях, когда в слое h наблюдается скорость

ветра v м/сек., то при ширине населенного пункта D км, нормальной к ветру, и

$$S = Dv\tau$$

формула (1) принимает вид

$$\delta_a = \frac{WQ}{8,64 \cdot 10^7 D v h} \quad (2)$$

Поскольку Коркинский карьер расположен почти в центре жилых массивов и производственных участков (рис. 1) и не является геометрически симметричным, ширина потока D (сечение

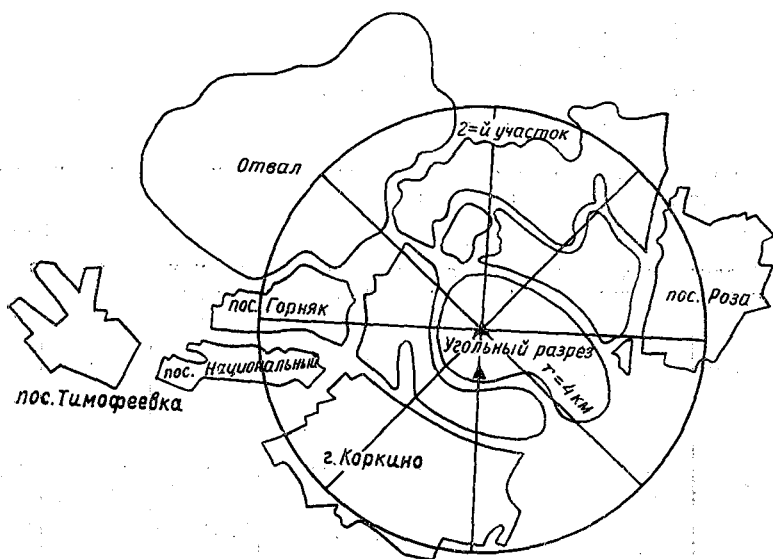


Рис. 1. Расположение жилых районов г. Коркино.

карьера, нормальное к ветру) будет неодинаковой. Исходя из этого было принято учитывать при разных направлениях ветра количество сжигаемого топлива по различным участкам, от которых водяной пар, образующийся при сжигании, выносится на карьер (табл. 2).

На основании данных Управления «Коркинуголь» о расходе топлива (угля) по месяцам (1965—1967 гг.), принятых нами в качестве среднего уровня расходов, и табл. 2 рассчитаны средние значения количества сжигаемого топлива за сутки в различных секторах потока (табл. 3).

При штилевой погоде S принято равным $50,24 \text{ км}^2$ ($r=4 \text{ км}$), а значение Q следует рассматривать как суммарное количество топлива, сжигаемое на всех участках в радиусе 4 км (нижняя строка в табл. 3).

Таблица 2

Ширина потока и участок сжигания топлива при данном направлении ветра

Направление ветра	Ширина потока, км	Участок сжигания топлива с выносом на карьер
З	2,5	Пос. Тимофеевка + пос. Горняк + пос. Национальный + 1/5 пл. Коркино
СЗ	2,3	1/10 пл. Коркино + отвал
С	3,0	1/2 (пос. Роза + 2-й участок без шахт Пригородная и Калач).
СВ	3,5	То же
В	2,5	
ЮВ	2,3	1/10 пл. Коркино
Ю	3,0	1/5 пл. Коркино
ЮЗ	3,5	1,0 пл. Коркино

Примечание. Для всех направлений ветра учитывается количество топлива, сжигаемое паровозами в карьере.

Таблица 3.

Среднее количество сжигаемого топлива (кг/сутки) в секторах потока воздуха над угольным разрезом по месяцам. Коркино

Направление ветра	Ширина потока, км	I	II	III	IV	V	VI
ЮЗ	3,5	878 000	874 800	611 900	324 800	193 000	193 500
З	2,5	358 000	352 000	259 000	185 000	141 000	104 000
СЗ	2,3	118 000	122 000	90 900	63 200	49 700	50 200
С	3,0	260 000	300 000	162 800	109 300	70 900	68 600
СВ	3,5	260 000	300 000	162 800	109 300	70 900	68 600
В	2,5	260 000	300 000	162 800	109 300	70 900	68 600
ЮВ	2,3	115 000	113 000	83 800	55 500	41 200	42 900
Ю	3,0	195 700	198 000	142 500	85 800	57 300	59 800
Штиль $r = 4$ км		1 516 000	1 584 600	1 010 600	597 900	368 500	331 000

Направление ветра	Ширина потока, км	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ЮЗ	3,5	158 600	153 600	354 900	765 000	656 000	796 500
З	2,5	115 000	81 000	189 000	290 000	283 000	294 000
СЗ	2,3	47 000	46 000	67 400	104 000	98 500	109 600
С	3,0	63 300	70 900	101 300	172 000	197 400	215 700
СВ	3,5	63 300	70 900	101 300	172 000	197 400	215 700
В	2,5	63 300	70 900	101 300	172 000	197 400	215 700
ЮВ	2,3	38 500	37 600	60 000	96 800	91 200	121 600
Ю	3,0	51 900	50 000	94 200	168 400	156 400	176 000
Штиль $r = 4$ км		306 100	279 900	620 200	1 164 600	1 154 900	1 307 300

На основании данных табл. 3 рассчитывается δ_a при штилевой погоде или при различных направлениях ветра. Если принять

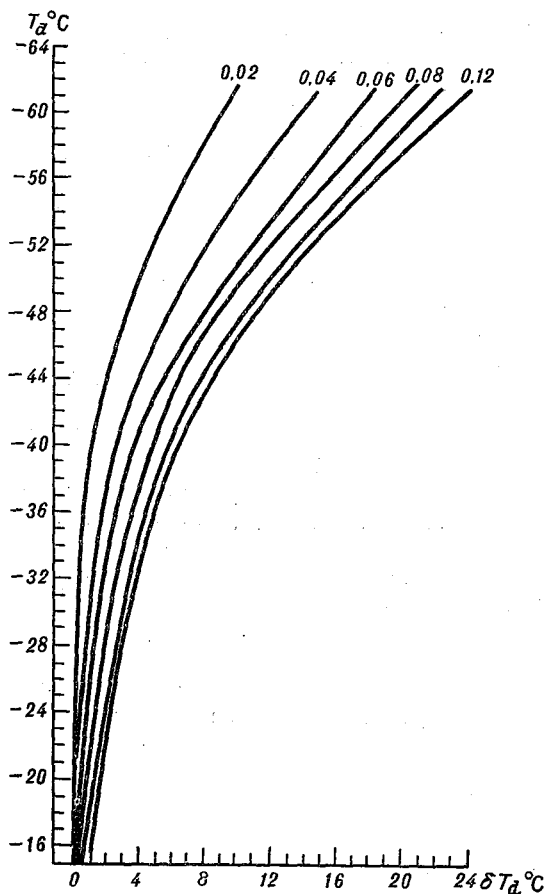


Рис. 2. Номограмма для вычисления приращения точки росы ($\delta T_d, ^\circ\text{C}$).

$H=50$ м и выразить Q в тыс. кг, формула (1) для Коркинского карьера примет вид

$$\delta_a = \frac{458Q}{6 \cdot 10^7} \tau. \quad (3)$$

Для штилевых условий погоды на основании (3) рассчитана табл. 4, содержащая δ_a при различных τ . Зная δ_a , можно определить приращение точки росы δT_d по специальной номограмме (рис. 2) [1].

Таблица 4

Весовое количество водяного пара (г/м^3), поступающее в Коркинский карьер при штиле, в различные месяцы года за различные отрезки времени

τ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
3	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04
6	0.07	0.07	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.05
12	0.14	0.14	0.09	0.05	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06	0.11	0.11	0.12
18	0.21	0.21	0.14	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	0.09	0.16	0.16	0.17
24	0.28	0.29	0.19	0.11	0.07	0.06	0.06	0.05	0.11	0.21	0.21	0.22

Примечание. Время τ рассматривается как прогнозируемый период.

Заметим, что учет δ_a возможен лишь при температуре ниже некоторого критического значения, зависящего от относительной влажности. Так, при $p_0=1000$ мб сочетания температуры и относительной влажности следующие [1]:

Относительная влажность, % . .	100	90	61	0
Критическая температура, °С . .	-29	-33	-36	-39

При температуре выше критической не достигается насыщение по отношению ко льду и туман не образуется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, ч. II. Л., Гидрометеониздат, 1965.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА В КАРЬЕРАХ

В работе [1] и в докладе на совещании «Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах» [2] Б. Г. Вагнер и П. А. Воронцов приводили некоторые уточнения теории плоскопараллельной струи, связанные с введением переменного по высоте масштаба турбулентности. В ходе дискуссии выявилась необходимость в более подробном объяснении используемых предположений и более полном выводе основного уравнения теории плоскопараллельной струи. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

Впервые задача о смешении турбулентной струи несжимаемой жидкости была успешно решена Толминым [5] в 1926 г. на основе прандтлевской теории пути смешения. Основные положения этой теории изложены во многих монографиях, например [6, 7, 8].

Перейдем теперь непосредственно к постановке задачи и выводу основного уравнения плоскопараллельной струи. Рассмотрим уравнения движения для двухмерного стационарного потока несжимаемой жидкости, которые можно представить в виде:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

где u и v — составляющие скорости потока, τ — касательное напряжение, ρ — плотность, ось x направлена вдоль потока, а ось y — перпендикулярно к нему.

Для определения касательного напряжения воспользуемся известной формулой Прандтля, согласно которой

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2, \quad (2)$$

здесь l — масштаб турбулентности.

Теперь для замыкания системы уравнений (1) — (2) следует только установить зависимость l от координат. В рассматриваемой теории закон изменения масштаба турбулентности в направлении течения выбирается из условия подобия пограничных слоев в различных поперечных сечениях свободного потока. При этом получается линейный закон возрастания l вдоль потока. Ввиду отсутствия стенок, вблизи которых масштаб турбулентности обычно уменьшается, предполагается, что в поперечном направлении он постоянен.

Итак, имеется зависимость

$$l = cx, \quad (3)$$

где c — эмпирическая постоянная.

Подставляя (3) и (2) в (1), получим следующее уравнение:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = 2l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (4)$$

После ряда преобразований (см., например, [6]) уравнение (4) сводится к основному уравнению плоскопараллельной струи несжимаемой жидкости.

$$F''' - F = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами и для него можно написать общее решение

$$F(\varphi) = c_1 e^{-\varphi} + c_2 e^{-\frac{\varphi}{2}} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \varphi\right) + c_3 e^{\frac{\varphi}{2}} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \varphi\right), \quad (6)$$

где $F(\varphi)$ — функция, пропорциональная функции тока $\psi = \int u dy$; а $\varphi = \frac{y}{ax}$ — независимая переменная.

Решение (6) используется в задаче о смешении равномерного потока со скоростью u_0 с неподвижной окружающей средой и неплохо согласуется с экспериментальными данными.

Задача о распределении скорости ветра в карьерах существенно отличается от вышеуказанной задачи о смешении потоков тем, что в карьере имеется твердая граница, гасящая колебательные движения частиц. Поэтому вблизи стенки масштаб турбулентности должен уменьшаться, что и подтверждается результатами экспериментальных исследований структуры турбулентного потока в карьерах, согласно которым ни масштаб турбулентности, ни коэффициент турбулентного обмена не остаются постоянными в поперечных сечениях. Это обстоятельство ограничивает возможности использования решения (6) для определения поля ветра в карьерах и позволяет надеяться, что один из возможных путей получения более реальных профилей скорости ветра из решения системы уравнений (1) — (2) состоит в использовании не- сколько другой гипотезы об изменении масштаба турбулентности. Как показали результаты измерений, приведенные в работе [9],

масштаб турбулентности линейно растет с высотой, причем коэффициент пропорциональности меняется почти в 3 раза в зависимости от времени суток и времени года.

Выберем теперь следующую зависимость масштаба турбулентности от координат:

$$l(x, y) = cx + dy, \quad (7)$$

где c и d — константы.

Представление l в виде двух слагаемых, каждое из которых является линейной функцией координат, целесообразно и с той точки зрения, что при подстановке (7) и (2) в (1) сохраняется однородность уравнения движения и удастся, как и в случае (3), свести систему уравнений к уравнению относительно одной переменной φ , определяемой равенством

$$\varphi = \frac{y}{ax}, \quad a = \sqrt[3]{2c^2}. \quad (8)$$

В системе координат (x, φ) безразмерная скорость оказывается функцией только одной координаты

$$\frac{u}{u_0} = F'(\varphi), \quad (9)$$

где u_0 — скорость в области невозмущенного потока, а $F'(\varphi)$ — производная от функции F , удовлетворяющей соотношению

$$\Psi = \int u dy = ax u_0 F(\varphi). \quad (10)$$

Производные скорости при этом выражаются через производные функции F :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -u_0 \frac{\varphi}{x} F'', \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_0}{ax},$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_0}{a^2 x^2} F''', \quad v = au_0 (\varphi F' - F). \quad (11)$$

Подставляя (11), (7) и (2) в (1) и произведя преобразования, получим следующее уравнение:

$$F'''(1 + b\varphi)^2 + b(1 + b\varphi)F'' + F = 0, \quad (12)$$

где b — константа, однозначно определяемая значениями c и d в формуле (7).

Уравнение (12) не удастся решить аналитически, и поэтому оно численно интегрируется методом Рунге-Кутты.

Так же, как и для уравнения (5) [5], на внутренней границе пограничного слоя ($\varphi = \varphi_1$) задаются следующие условия:

составляющая скорости по оси x равна скорости невозмущенного потока ($F'(\varphi_1) = 1$);

составляющая скорости по оси y равна нулю ($F(\varphi_1) = \varphi_1$);

вертикальный градиент u — компоненты скорости, обращается в нуль ($F''(\varphi_1) = 0$).

Легко видеть, что уравнение (12) при $b=0$ переходит в (5). Изменяя значения постоянных c и d в формуле (7) в зависимости от стратификации, мы получим различные значения параметра b в уравнении (12), что приводит, естественно, к изменению профилей компонент скорости. Таким образом, в отличие от (5), уравнение (12) позволяет хотя бы косвенно учитывать влияние стратификации и получать распределение поля ветра при различных состояниях устойчивости.

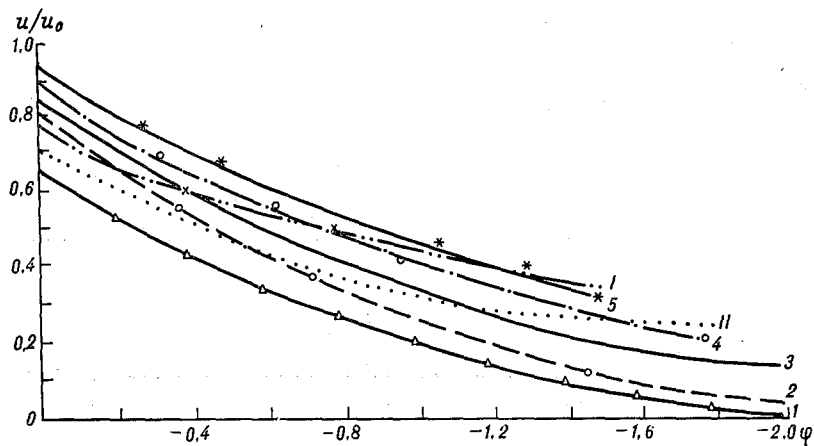


Рис. 1. Профили безразмерной скорости

I — аналитическое решение (6); *I* и *II* — численное решение уравнения (12) при $b = -0,1$ и $b = 0,1$; 2–5 — экспериментальные профили скорости, причем 2 и 3 соответствуют зимнему периоду, а 4 и 5 — летнему.

Результаты численного решения уравнения (12) при $b = -0,1$ (кривая *I*), $b = 0,1$ (кривая *II*) и при $b = 0$ (кривая *I*), т. е. решение уравнения (5) приведено на рис. 1. Для сравнения теоретических данных с экспериментальными на этот же график нанесены профили скорости ветра, полученные по материалам базисных шаропилотных наблюдений, проведенных в Коркинском карьере. Как видно из рисунка, решения уравнения (12) дают возможность построить качественно более правильное распределение ветра в карьере.

В заключение следует отметить, что приведенная нами методика расчета поля скорости ветра требует, однако, более тщательной проверки на материалах других карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагер Б. Г., Воронцов П. А. Некоторые уточнения теории плоскопараллельной струи. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.
2. Вагер Б. Г., Воронцов П. А. Структура воздушного потока и некоторые уточнения теории плоскопараллельной струи. Тезисы доклада к совещанию «Состояние и перспективы исследования микроклимата в карьерах». Л., 1971.

3. Битколов Н. З., Никитин В. С. Проветривание карьеров. М., Госгортехиздат, 1963.
4. Битколов Н. З. Проветривание карьеров. Учебное пособие, Л., 1964.
5. Tollmien W. Berechnung turbulenter Ausbreitungen — vorgehen, Zeitschr. Angew. Math. und Mech. 1926, В. 6, Н. 6.
6. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
7. Бай Ши-и. Теория струй. М., Физматгиз, 1960.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Физматгиз, 1970.
9. Воронцов П. А., Селицкая В. И., Честная И. И. Учет экспериментальных данных при расчете естественного воздухообмена в карьерах. — Труды ГГО, 1972, вып. 294.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Н. З. Битколов, П. А. Воронцов. Задачи метеорологических исследований при проветривании карьеров	5
П. А. Воронцов, В. С. Ивашкин, В. П. Куликов, В. Н. Щербак. Режим ветра и турбулентности атмосферы и их учет при оценке естественного проветривания глубоких карьеров	11
Л. В. Безлюдова, Н. Ф. Белов. Анализ климатообразующих процессов, при которых формируются инверсии в Коркинском угольном разрезе	26
Л. В. Безлюдова. Особенности суточного хода температуры в Коркинском карьере	35
Н. С. Смирнова. О некоторых особенностях микроклимата рабочих мест в южных карьерах	46
И. И. Иванов. Применение гидравлического интегратора при математическом моделировании геотермических процессов в карьерах	53
И. И. Иванов. К вопросу о методике производственных геотермических исследований в карьерах	63
С. И. Зенов. Использование аналоговых вычислительных машин для изучения процессов рассеяния примесей в атмосфере карьеров	69
Н. З. Битколов, И. И. Иванов. О тепловом режиме глубоких карьеров	75
Н. З. Битколов, И. И. Иванов. Теоретические основы процесса разрушения инверсий в карьерах	86
В. И. Бекряев. Трансформация метеорологических полей в карьере при искусственной вентиляции	95
Л. А. Казаков. Расчеты вертикального профиля концентрации загрязняющих веществ и оценка возможностей ее уменьшения путем перемешивания воздуха в карьерах	112
З. И. Алексеева, Н. З. Битколов, И. И. Иванов. Опыт эксплуатации комплекса измерительных приборов в условиях карьеров	117
Л. А. Хайдожко. Влияние притока влаги при сжигании топлива промышленными объектами на формирование туманов в Коркинском карьере	124
Б. Г. Вагер. О возможности использования теории плоскопараллельной струи при исследовании ветрового режима в карьерах	129

ТРУДЫ ГГО, ВЫП. 310

Микроклимат карьеров

Редактор Л. В. Царькова

Техн. редактор Г. В. Ивкова

Корректоры: Н. А. Балкина, Е. П. Баскакова

Сдано в набор 23/II 1973 г. Подписано к печати 28/V 1973 г. М-П200. Формат 60×90¹/₁₆.
Бумага тип. № 1. Печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 8,75. Тираж 680 экз.
Индекс МЛ-142. Заказ 387. Цена 61 коп. Гидрометеиздат, 199053, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 12 им. М. И. Лоханкова «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. 196126, Ленинград, ул. Правды, 45.

УДК 550.836

Задачи метеорологических исследований при проветривании карьеров. Битколов Н. З., Воронцов П. А. Труды ГГО, 1973, вып. 310, с. 5—10.

Формулируются основные задачи метеорологических исследований в карьерах, включающие постановку комплексных климатических наблюдений в основных горнопромышленных районах страны, уточнение теории процессов естественного воздухообмена, разработку методов прогноза опасных метеорологических явлений и создание теории искусственного воздействия на атмосферу карьеров.

УДК 551, 552

Режим ветра и турбулентности атмосферы и их учет при оценке естественного проветривания глубоких карьеров. Воронцов П. А., Ивашкин В. С., Куликов В. П., Щербак В. Н. Труды ГГО, 1973, вып. 310, с. 11—25.

В статье приведены материалы по режиму ветра и турбулентности и их учету при оценке естественного проветривания в глубоких карьерах. Даны приближенная формула распределения ветра в карьерах, характеристика повторяемости инверсий при различных направлениях ветра, величины сдвига ветра, значения коэффициента турбулентности мезомасштабных струй и другие характеристики структуры ветрового режима.

Табл. 10. Илл. 3. Библ. 5.

УДК 551.552

Анализ климатообразующих процессов, при которых формируются инверсии в Коркинском угольном разрезе. Безлюдова Л. В., Белов Н. Ф. Труды ГГО, 1973, вып. 310, с. 26—34.

На основе анализа междусрочных и межсуточных процессов исследуется роль различных метеорологических факторов в формировании внутрикарьерных инверсий. В частности, показано, что основную роль в этом формировании играет адвекция тепла. Наиболее же благоприятные условия для инверсий создаются при совместном воздействии адвекции тепла и солнечной радиации. Именно в условиях малооблачной погоды при наличии адвекции тепла формируются наиболее интенсивные инверсии. Показано, что скорость ветра также влияет на формирование инверсий. Они чаще всего возникают при скоростях ветра, меньших 5 м/сек.

Даются эмпирические уравнения связи межсуточного изменения разности температур воздуха дно — поверхность в зависимости от межсуточного изменения температуры воздуха на поверхности при различных условиях погоды, связанных с адвекцией тепла. Эти уравнения могут быть использованы для прогноза инверсий в карьере.

Табл. 3. Илл. 1. Библ. 1.