

ГАЗОДИНАМІКА

УДК 533:536.46+537

Кузнецов А.А. , Конопасов Н.Г.

Владимирский государственный университет, Россия.

E-mail: artemi-k@mail.ru

Вентиляция угольного разреза применением метеотрона I

Приведены характеристики метеотрона тепловой мощностью 0,24 миллиона киловатт и условия экспериментов по вентиляции открытого угольного карьера тепловым способом. Предложены механизмы внутрикратерного тепло- и массообмена при развитии инверсионном газовом слое. Результаты экспериментов описаны и соотнесены с предложенными механизмами.

В 1969 году при отработке на глубину более 200 м в Коркинском угольном разрезе в зимнее время наблюдалось снижение видимости вплоть до сильного тумана при увеличении концентрации угарного газа выше предельно допустимой концентрации (ПДК). Специально организованная метеорологическая станция проводила наблюдения для определения условий появления застойных явлений в карьере [1]. Оказалось, что при сильном ветре (10 м/с и более) и неустойчивой стратификации вредные примеси не задерживались внутри карьера. Загазованность возникала только при устойчивой стратификации при инверсии температуры в приземном слое и слабом ветре (таблица).

За слабую дымку принималось небольшое помутнение воздуха, когда объем разреза еще просматривается, а концентрация примесей угарного газа пренебрежимо мала. Умеренная дымка имела голубоватый, а при повышенной влажности белесоватый цвет, горизонтальная видимость составляла 1000 м, по-

Таблица. Визуальная оценка интенсивности и продолжительности загазованности карьера

Месяц, год	Общее время, час	Число часов с дымкой			
		Всего	В том числе		
			Слабая	Умеренная	Сильная
IX 1969	720	40	26	14	-
X 1969	720	153	95	58	-
XI 1969	720	353	275	53	24
XII 1969	744	264	180	84	-
I 1970	744	230	121	82	27
II 1970	672	147	135	12	-
III 1970	744	101	101	-	-
IV 1970	720	6	6	-	-

лувертикальная до 200 м, концентрация угарного газа ниже ПДК. Сильная дымка характеризовалась помутнением серого цвета (смогом), потерей видимости с борта дна разреза и с содержанием угарного газа выше ПДК. В Коркинском разрезе смог чаще появлялся с октября по март. Летом умеренной и сильной дымки не наблюдалось, а в предрассветные и утренние часы наблюдалась слабая дымка в интервале времени не более 6 часов. Зимой продолжительность сохранения дымки достигала более 60 часов.

Появление в разрезе умеренной и сильной дымки зимой в 90% случаев связано с антициклональным характером погоды. В заполненный смогом разрез солнечная радиация не проникает, а на поверхности в условиях ясной антициклональной погоды суточный ход температуры явно выражен. Наличие в атмосфере мощного инверсионного слоя способствует возникновению в разрезе смоговых явлений повышенной интенсивности. При этом воздух на дне разреза более холодный и тяжелый, чем на борту. Чтобы поднять такой воздух до уровня борта, энергии ветра и солнечной радиации уже недостаточно и атмосфера карьера оказывается изолированной. Как правило, смоговые явления сопровождались внутрикьерной инверсией вертикального распределения температуры. В условиях Коркинского разреза концентрация угарного газа на нижних горизонтах превышала ПДК на вторые-третьи сутки сохранения инверсии температур. Основной задачей вентилиций карьера тепловым способом являлось снижение концентрации газообразной окиси углерода.

Метеотрон первой модификации (Метеотрон I). Тепловая установка метеотрон I [2 – 5] использовалась в г. Коркино Челябинской области для вентилиции открытого угольного разреза глубиной 250 м и общим объемом $6 \cdot 10^8 \text{ м}^3$. Три одинаковые консольные фермы с форсунками располагались на дне в центре карьера. Каждая ферма имела одну степень свободы вращения в горизонтальной плоскости около неподвижной вертикальной оси. Шарниры ферм располагались в непосредственной близости друг от друга. Это конструктивное решение позволяло изменять плотность мощности тепловыделения за счет изменения площади, занимаемой установкой, и применялось в зависимости от условий эксперимента. При расходе дизельного топлива 2 л/с на одну ферму максимальная мощность тепловыделения составляла 0,24 млн. кВт (прил. 1) при объеме пламени около 500 м^3 (рис. 1).

Специфика опытов состояла в том, что решение об их проведении принималось по результатам анализов на содержание окиси углерода в атмосфере карьера. Быстрое увеличение концентрации этого газа происходило в условиях развитой внутрикратерной инверсии температуры. Эксперименты начинались, как правило, при развитии смога в придонной части чаши карьера, грозившего остановкой добычи угля.

Таким образом, начальные условия эксперимента были следующими: в полузамкнутом объеме в виде опрокинутого усеченного конуса (кратера), находился приподнятый «точечный» тепловой источник, образуемый придонным свободным сжиганием топлива, распыленного специальным устройством метеотронного типа. При этом сжигание топлива ограничено в доступе «по окис-

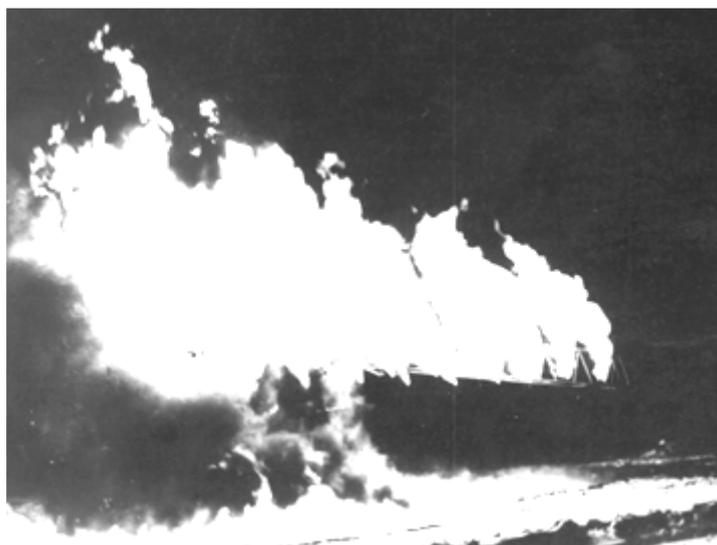


Рис. 1. Компьютерная версия фотографии составного факела пламени метеотрона I на дне открытого карьера г. Коркино (1970 – 1971 гг.)

лителю», а генерация и развитие восходящей струи нагретых продуктов ограничены «затопленной инверсионной газовой пробкой». Вертикальный градиент температуры от дна карьера – положительный, а на границе инверсионного слоя – резко меняет знак.

В зависимости от плотности мощности тепловыделения источника, высоты, объема и теплофизических характеристик «инверсионной пробки» интенсивный радиационный прогрев резонирует динамические процессы внутри системы инверсионного слоя: конвекционное и диффузионное перемешивание в горизонтальных слоях от центра – к периферии (к стенкам карьера) и в вертикальном направлении против начального градиента температур [3]. При малой плотности тепловыделения (при работе одной фермы установки) объем инверсионного слоя медленно растет при падении эффективности сгорания топлива из-за нарастающей нехватки кислорода в придонной области кратера. В этом случае туман в чаше кратера исчезает, а концентрация окиси углерода и примесей от работы установки возрастает. При пуске установки на полную мощность конвекционное перемешивание в системе внутрикарьерного инверсионного слоя приобретает сильную вертикальную приосевую составляющую.

Процессы тепло и массообмена при вентиляции открытого карьера тепловым способом. Объем инверсионного слоя растет быстро за счет выдувания «пузыря» на его верхней поверхности. С борта карьера, покрытого снегом (рис. 2), отчетливо видно формирование «пузыря» инверсионного газового слоя, надуваемого восходящим теплым воздухом со дна карьера I [3, 4]. На уровне внутрикарьерной конденсации поверхность инверсионного слоя приобретает визуально определяемую структуру. В приосевой области пузыря на границе инверсионного слоя возникают концентрические кольца конденсации, а на периферии они размыты. Первое обстоятельство указывает на наличие нагретых вихревых колец, поднимающихся по оси струи [6]. Последнее обстоятельство указывает на решающий эффект, который можно было заметить и на



Рис. 2. Компьютерная версия фотографии половины поверхности внутрикратерного «пузыря» инверсионного слоя

дне карьера по внезапному и резкому усилению интенсивности горения топлива в установке. Приосевое надувание пузыря приводит к деформации всей поверхности, утонению и опусканию периферийных, пристеночных областей инверсионного слоя. Натекающий с бортов карьера холодный воздух «смывает» контакт инверсионного слоя со стенками карьера, и, в конечном итоге достигает его дна. Далее нагретый инверсионный пузырь растет, подпитываясь снизу, стекающим с бортов карьера воздухом [3].

При правостороннем движении дорога «серпантина» в карьере имеет уклон несколько градусов и закручивается сверху – вниз «против часовой стрелки». Поступающий в карьер бортовой воздух приобретает ступенчатую динамическую структуру со слабой тангенциальной составляющей соответствующего направления пристеночного слоя.

С одной стороны течения воздуха с бортов карьера и нагретых газов метеотрона разнесены в пространстве карьера и разнонаправлены по вертикали. С другой стороны изменение структуры уровня конденсации от центра – к периферии (рис. 2) свидетельствует о наличии приповерхностных центробежных течений, которые замыкаются в циркуляционную ячейку при встрече с бортовым течением. Исходя из вышесказанного, резонно предположить в условиях формируемой неустойчивости Бенара реорганизацию надуваемого пузыря инверсионного слоя в конвекционную ячейку в форме объемного вихря Хилла [7] с восходящим движением нагретых продуктов сгорания по оси конического кратера и нисходящим движением, сопутствующим стекающему холодному воздуху по периферии.

С развитием активный участок восходящей струи метеотрона приобретает закрутку, свойственную вертикальным струям северного полушария («против часовой стрелки») [8]. Это привносит определенные изменения в динамическую структуру вихря. С одной стороны возникает приосевое нисходящее тече-

ние (рис. 2) с вертикальным смещением уровня конденсации. С другой стороны поступающий сверху по «серпантину» бортовой воздух закручивается также «против часовой стрелки» (см. выше), организуя противоток плоскому движению тела вихря с препятствием его закрутки.

Нагретая инверсионная пробка имеет динамическую структуру в форме вихря Хилла, быстро всплывает вверх и далее медленно «выдавливается» поступающим на дно карьера бортовым холодным воздухом. Диаметр раструба вертикальной осесимметричной нагретой струи оценивается по углу его раскрытия (22° [9]) и составляет 100 м на уровне борта карьера. Диаметр воронки нисходящего приосевого течения – около 20 м (см. рис. 2). Вихревые, противоточные, восходящие и нисходящие течения способствуют перемешиванию инверсионного газа с холодным окружающим воздухом и нагретыми продуктами сгорания. Уменьшение массы при аккумуляции положительной плавучести вихря [10], «надетого» на восходящую нагретую струю, приводит в конечном итоге к формированию вихревого кольца и его выносу в составе нагретой струи за пределы объема карьера.

Обеспечение процесса непрерывного тепло и массообмена при непрерывном стекании масс воздуха с поверхности карьера требует создание тепловых источников большой мощности. Однако, увеличение плотности тепловыделения может привести к организации мощных приосевых вертикальных протяженных и устойчивых течений, которые, в свою очередь, будут стимулировать на всем протяжении сжатой струи приосевых вращательных движений типа торнадо, вытягивающих не только газ с придонных горизонтов, но и элементы конструкции самой установки. В этом случае, дороги, типа спиральный «серпантин», соединяющие нулевой уровень и дно большого разреза, могут играть роль направляющих для потоков. Направление их закрутки становится безразличным.

Результаты экспериментов. Датчики температуры и скорости потока были подвешены на стальном тросе длиной 200 м, натянутом с горизонта 30 м северного борта. Высота подъема датчиков могла регулироваться натяжением троса. На участке троса, расположенном над установкой, было закреплено по 7 датчиков температуры и скорости с шагом 4 м. Наряду с измерениями профилей скорости и температуры производились теодолитные измерения высоты подъема струи и ее фотографирование. В этих опытах под установкой зажигались дымовые шашки. Были проведены опыты с изменением площади тепловыделения. Опыт при площади тепловыделения 180 м^2 проводился в условиях устойчивой атмосферы с градиентом температуры по высоте $0.7^\circ/100 \text{ м}$. Диаметр струи на уровне борта был равен 100 м, а максимальная высота подъема 500 м.

В зависимости от величины внутрикарьерной инверсии условия нормального воздухообмена в карьере формировались в течение 2 – 12 часов непрерывной работы тепловой установки метеотрон I. Во всех опытах по истечении указанного интервала времени скорость придонного газа оставалась около нулевой, а скорость бортового воздуха значительно повышалась в $3 \div 5$ раз в

течение 3 – 5 часов, а затем медленно падала, оставаясь выше начальной (до опыта). Придонная видимость резко (в течение минут) возрастала в $10 \div 50$ раз, приближаясь по величине к значениям неизменной бортовой видимости. Это сопровождалось резким падением концентрации окиси углерода на $2 \div 4$ порядка без последующего роста. Влажность придонного воздуха сохранялась практически постоянной и падала в $1,5 \div 2$ раза лишь при продолжении работы метеотрона.

Наиболее интересной была динамика температуры при сравнении ее бортовых и придонных значений. При работе метеотрона до момента начала изменения бортовой скорости воздуха его температура на борту и в придонной части практически не менялась, испытывая медленные флуктуации в пределах ± 2 градуса. При этом придонная температура была во всех опытах (ноябрь – март) ниже на $4 \div 6$ градусов. После изменения бортовой скорости воздуха при его стекании в объем карьера, динамика указанных температур приобретает согласованность и выравнивание по величине. При этом значение придонной температуры сначала стремится к значению бортовой, а затем они согласованно во времени равномерно падают, коррелируя с медленной динамикой влажности придонного воздуха (см. выше).

Заключение.

Системная внутрикарьерная динамика воздушных масс при работе метеотрона в условиях внутрикарьерной инверсии температур определена строгой последовательностью динамических состояний, распределенных на временной оси при непрерывной работе метеотрона. Непрерывный интенсивный локальный центральный нагрев снизу инверсионного газового слоя, затопленного внутри полуоткрытого кратера карьера, вызывает первую фазу указанной последовательности – прогрев слоя («инверсионной пробки») за счет теплопроводности. При таких условиях в слое устанавливается стационарный поток тепла, идущий снизу вверх. Этот относительно длительный процесс не приводит к существенным изменениям придонных и бортовых значений термодинамических и химических параметров. Однако, при этом верхняя поверхность газового слоя деформируется симметрично в форме «выдуваемого пузыря». При росте градиента температуры и достижении им порогового значения, стационарное состояние покоя газового слоя становится неустойчивым. Если скорость подвода тепла становится больше, чем скорость отвода тепла от нижней поверхности слоя за счет теплопроводности, характерной для природы вещества, то система выбирает более эффективный для нее механизм передачи тепла с заданной скоростью – конвекцию. В поле тяготения в горизонтальном слое с вертикальным градиентом температуры возникает неустойчивость Бенара. Флуктуации конвективного течения усиливаются и завладевают всей системой инверсионного слоя, устанавливая новый динамический порядок, соответствующий гигантской флуктуации в форме диссипативной структуры вихря Хилла. Приток стекающего в карьер бортового воздуха нарастает, а бортовая и придонная температуры выравниваются. Вихревая структура всплывает вверх, придонная видимость

резко возрастает, а придонная концентрация СО также резко падает до значений, сравнимых с бортовыми.

При всплывании вихревой структуры эффект инверсионной пробки не исчезает, но принимает иное качество. Динамика вихря является неотъемлемой частью системной динамики воздушных масс внутри и на борту карьера. При подъеме диаметр вихря растет, а высота убывает. Нисходящие течения на периферии вихря вовлекают бортовой воздух и способствуют его стеканию. Центральные восходящие течения, подпитываемые нагретой струей метеотрона, обеспечивают положительный градиент давления по высоте. Поэтому и бортовая и придонная температуры начинают медленно падать при подъеме вихря. В теле вихря радиальное давление становится избыточным, что приводит к резкому расширению вихря при всплывании на уровень борта, трансформации в огромное вихревое кольцо и «раскатыванию» его в радиальном направлении за объем карьера на динамической подложке стекающего в противоположном направлении бортового воздуха. Остатки инверсионного газа выводятся в форме вихревого кольца за рамки карьера, что и является основанием для выключения метеотрона при завершении полной вентиляции кратера.

Литература:

1. Бухман А.З., Воробьев Б.М., Козаков Л.А. О выборе способа и схем проветривания карьеров с учетом метеорологических условий // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – Вып. 359. – С. 243 – 248.
2. АС. 311009 (СССР) Устройство для проветривания карьеров / Б.И. Баранцев, В.Л. Васильев, Н.Г. Конопасов и др. – Заявл. 08.09.1970, № 1471495/22-3; Оpubл. в Б. И., 1971, № 24; МПК Е 21с. 47/00.
3. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Вертикальные струи и проветривание локальных воздушных бассейнов // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь: СевГТУ, 2001. – С. 125 – 129.
4. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Процессы при проветривании карьеров тепловым источником // Современные промышленные технологии. – Н. Новгород. НГТУ, 2006. – С. 17.
5. Вентиляция глубоких разрезов тепловым способом / В. Н. Кунин, Г.И. Васильев, Н. Г. Конопасов [и др.] – М.: ЦНИЭИ уголь, 1972. – 27 с.
6. Кузнецов А.А. Экспериментальное исследование динамической структуры вертикального факела пламени при работе метеотрона III // Физика аеродисперсных систем. – 2008. – Вып. 45. – С. 55 – 66.
7. Лэмб Г. Гидродинамика: пер. с англ. / под ред. Н.А. Слезкина. – М.-Л.: ОГИЗ. Гостехиздат, 1947. – 929 с.
8. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Динамика параметров окружающей среды при работе тепловой установки метеотрон V // Инженерная физика. – 2012. – № 1. – С. 4 – 12.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1987. – 840 с.

10. *Batchelor G.K.* Heat convection and buoyancy effects in fluids / Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. –1954. – V. 80, № 345. – P. 339 – 358.

Кузнецов А.А. , Конопасов Н.Г.

Вентиляція вугільного розрізу використанням метеотрона I

АНОТАЦІЯ

Приведені характеристики метеотрона з тепловою потужністю 0.24 мільйона кіловат і умови експериментів по вентиляції відкритого вугільного кар'єру тепловим способом. Запропоновані механізми внутрішньократерного тепло- і масообміну при розвиненому інверсійному газовому прошарку. Результати експериментів описано і порівняно із запропонованими механізмами.

Kuznetsov A. A., Konopasov N.G.

Use meteotron I for coal mine ventilation

SUMMARY

The meteotron characteristics with thermal power of 0.24 million kilowatts and experimental conditions on an open coal mine ventilation heat method are shown. Heat and mass transfer mechanisms are proposed in case of pronounced inversion gas layer. Experimental results are described and compared with the proposed mechanisms.