

РАЗРУШЕНИЕ ВНУТРИКАРЬЕРНЫХ ИНВЕРСИЙ ЕСТЕСТВЕННЫМИ ВЕТРОВЫМИ ПОТОКАМИ

Аннотация. Представлены результаты исследований разрушения внутрикарьерных температурных инверсий, проведенных в Московском горном институте. Актуальность основана на необходимости более точной оценки естественного проветривания глубоких карьеров при наличии инверсионной температурной стратификации выработанного пространства. Одним из главных методов исследования стал метод физического моделирования. Для его проведения необходимо было обеспечить подобие инверсионных температурных градиентов в модели и натуре. Дано обоснование этого критерия. Исследование разрушения инверсий естественными ветровыми потоками путем физического моделирования производилось в аэродинамической трубе института. Задачей исследования явилось изучение разрушения внутрикарьерных инверсий потоками воздуха различной интенсивности для карьеров с разными геометрическими размерами при сохранении действия факторов, обуславливающих наличие инверсионного градиента. В результате исследований получены формулы для определения скоростей естественных ветровых потоков, при которых происходит разрушение общекарьерного инверсионного градиента температуры. Полученные зависимости проверялись по данным специальных метеостанций, находившихся на пяти карьерах Урала. Обработка указанных данных показала их хорошую сходимость с расчетами по полученным формулам. Было установлено, что скорости, при которых инверсия разрушается, зависят не только от величины температурного инверсионного градиента при штиле, но также и от глубины карьера и отношения линейных размеров карьера по поверхности к глубине. Показано, что при средних значениях указанного отношения и небольших инверсионных градиентах, глубинах карьера 200–250 м в среднем скорости ветра, при которых инверсии разрушаются, соответствуют известной классификации. Однако при увеличении глубины карьеров, уменьшении отношения положение изменяется — для разрушения внутрикарьерных инверсий в этом случае требуются поверхностные ветровые потоки довольно большой интенсивности.

Ключевые слова: аэрология карьеров, метеорология, температура, физическое моделирование, критерии подобия, естественное проветривание, скорость ветра, разрушение инверсий.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-14-19

Как известно, инверсия температур в карьере в итоге приводит к его заполнению холодным воздухом, поступательное его движение прекращается, возникает сильное затухание турбулентности и происходит загрязнение выработанного пространства вредными газами и пылью [1]. В то же время, при сильных ветровых потоках на поверхности карьера температурная инверсия разрушается, что приводит к уменьшению в нем концентраций вредностей. Однако при

этом с большей интенсивностью происходит загрязнение этими же вредностями прилегающих к карьере территорий. Следовательно, становится неизбежным одновременное решение задач проветривания карьеров, возникающих экологических проблем, а также проблем повышения эффективности производства [2, 3]. Заметим, что решению этих проблем и их последствий посвящены многие работы, как российские, так и зарубежные, например [4–8].

Актуальность настоящей публикации основывается на необходимости более точной оценки естественного проветривания глубоких карьеров при наличии инверсионной температурной стратификации выработанного пространства, а также связана с увеличением числа карьеров глубиной более 200–250 м, главным образом, в восточных регионах России, в которых при характерном для них антициклональном состоянии атмосферы инверсии наблюдаются особенно часто. В статье представлены результаты исследования разрушения внутрикарьерных температурных инверсий, проведенных автором.

Одним из главных методов данного исследования стал метод физического моделирования [9]. Для его проведения необходимо было обеспечить подобие инверсионных температурных градиентов в модели и натуре. Это подобие достигалось соблюдением критерия:

$$m = \frac{\gamma_n \cdot L_n}{T_n} = \frac{\gamma_a \cdot L_a}{T_a} = idem, \quad (1)$$

где L_n, L_a — характерный линейный размер карьера в натуре и модели; γ_n, γ_a — температурный градиент в карьере в натуре и модели; T_n, T_a — характерная температура в натуре и модели.

Применение критерия m было обосновано В.В. Силаевым для случая адиабатического температурного градиента γ_a , им же было высказано предположение о применимости этого критерия при моделировании любого температурного градиента. Для обоснования этого предположения с целью описания процесса разрушения инверсии в систему уравнений, обычно используемых при изучении вопросов карьерной вентиляции, то есть уравнений движения, статики, неразрывности и состояния, было введено уравнение притока тепла [10], непосредственно описывающее термодинамические процессы в атмосфере. Если

рассматривать изменения микроклиматических характеристик внутрикарьерной атмосферы только по вертикали, учесть малость «нетурбулентного» притока тепла по сравнению с турбулентным, то для стационарного процесса уравнение притока тепла упрощается:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) \omega = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где ω — вертикальная составляющая скорости воздуха; k — коэффициент турбулентного обмена; T — температура; z — вертикальная координата.

Учитывая, что температурный градиент с точностью до знака равен $\gamma = \partial T / \partial z$, и, применяя известные методы вывода необходимых критериев подобия, из уравнения (2) получаем критерий подобия m (1).

Исследование разрушения инверсий естественными ветровыми потоками путем физического моделирования, при котором соблюдались также динамическое (равенством средних скоростей воздушного потока) и геометрическое подобия, производилось в аэродинамической трубе Московского горного института. Задачей исследования явилось изучение разрушения внутрикарьерных инверсий определенных температурных градиентов потоками воздуха различной интенсивности для карьеров с разными геометрическими размерами при сохранении действия факторов, обуславливающих наличие инверсионного градиента.

Инверсионное состояние атмосферы моделировалось тепловым способом с помощью нагревательных элементов, помещаемых над моделью карьера. Различные инверсионные градиенты создавались подачей через лабораторные трансформаторы на концы нагревательных элементов разных напряжений. Нагрев элементов осуществлялся до стабилизации внутрикарьерного температурного градиента. После стабилизации

имитировался естественный ветровой поток и производились замеры температуры воздуха. При этом нагревательные элементы не отключались, имитируя продолжение действия природных факторов, обуславливающих сохранение инверсии и при наличии ветровых потоков. Эксперименты были проведены для карьеров со следующими отношениями их длины по поверхности к глубине: 6,9; 4,36; 1,81.

В результате было установлено, что величина инверсионного температурного градиента в выработанном пространстве карьера при его естественном проветривании зависит от инверсионного градиента при штиле, скорости и температуры естественных ветровых потоков, глубины и отношения размеров карьера в плане к его глубине. В результате статистической обработки, а также на основании возможности пересчета значений температурных градиентов с модели на натуру с помощью критерия m (1) было получено выражение для определения общекарьерного инверсионного температурного градиента.

На основании указанного выражения была выведена формула для определения скоростей естественных ветровых потоков, при которых происходит разрушение общекарьерного инверсионного градиента температуры (отметим, что обработка результатов эксперимента велась таким образом, что в полученных формулах инверсионному состоянию соответствуют положительные значения температурного градиента):

$$v_{гр} = 316,5 \cdot \gamma_{нш} \cdot \frac{H_k}{T_n} - 0,32 \cdot (t_{ш} - t) - \frac{0,35(2 \cdot L_n + L_A - 0,84 \cdot H_k)}{H_k}, \quad (3)$$

$$- \frac{4663 \gamma_{нш}^2 \cdot H_k^2}{T_n^2} + 0,64$$

где $\gamma_{нш}$ — инверсионный температурный градиент при штиле, °С; $t_{ш} - t$ — раз-

ность температуры воздуха во время штиля и при наличии ветра на поверхности карьера, °С; L_n — длина по поверхности прибортовой подветренной части карьера, м; L_A — длина по дну карьера вдоль направления ветра, м; H_k — глубина карьера, м.

Для ориентировочных расчетов при значениях независимых параметров, при которых рассматриваемый процесс не моделировался, были выведены линейные зависимости определения величин инверсионного градиента при естественном проветривании γ_n и скорости ветра $v_{гр}$.

Полученные зависимости проверялись по данным специальных метеостанций, находившихся на пяти карьерах Урала (глубина карьеров составляла от 106 до 303 м) — Сибайском, Учалинском, Гороблагодатском, карьере комбината «Ураласбест» и Коркинском угольном разрезе. Специальные карьерные метеостанции проводили регулярные круглосуточные наблюдения за метеорологическими элементами на дне и поверхности карьеров. При этом наблюдение производилось с помощью приборов и по методикам, принятым в Гидрометслужбе. Обработка указанных данных показала их хорошую сходимость с расчетами по полученным формулам. Это, а также разнообразие природных и технологических факторов, геометрических параметров, определяющих процессы естественного воздухообмена в перечисленных выше карьерах, указывают на достоверность рассматриваемых зависимостей.

Заметим, что известная классификация схем естественного проветривания карьеров предполагает, что переход от термических схем аэрации к динамическим происходит при скоростях ветра 0,8–1 м/с и не зависит от геометрических параметров выработанного пространства [1, 11]. Впрочем, исследования

Скорости воздушного потока на поверхности карьера, при которых происходит разрушение инверсионного температурного градиента, м/с
The speed of the air flow on the surface of the quarry that leads to the destruction of the inversion of the temperature gradient, m/s

$(L_n + L_A)/H_k$	H_k , м	Инверсионный градиент при штиле $\gamma_{\text{шт}}$, °С/м		
		0,01	0,01–0,03	0,03
< 2	< 100	до 0,5	0,5–1,6	2,0–3,0
	100–250	0,5–2,2	2,0–4,8	3,0–9,0
	250–800	2,5–4,2	5,0–11,0	более 10,0
2–5	< 100	0,1	0,1–0,6	0,6–2,0
	100–250	0,1–1,2	1,0–3,9	2,0–7,7
	250–800	1,5–3,3	4,0–10,0	более 8,0
5–10	< 100	0,1	0,1	0,1–0,4
	100–250	0,1	0,1–2,3	1,0–6,1
	250–800	0,1–1,7	2,0–8,0	более 7,0
> 10	< 100	0,1	0,1	0,1–0,5
	100–250	0,1	0,1–0,7	0,5–4,5
	250–800	0,1–0,5	0,5–6,4	более 5,0

на Коркинском угольном разрезе (при глубине более 300 м) показали, что инверсии сохраняются и при скоростях ветра на поверхности от 6–7 м/с и выше [12, 13].

Полученные с помощью моделирования зависимости и на их основе вычисленные скорости разрушения инверсий объясняют этот факт. В самом деле, как видно из таблицы, указанные скорости, при которых внутрикарьерная инверсия «исчезает», зависят не только от величины температурного инверсионного градиента при штиле $\gamma_{\text{шт}}$, но также от глубины карьера H_k и отношения линейных размеров карьера по поверхности к глубине $(L_n + L_A)/H_k$.

Как видно, при средних значениях $(L_n + L_A)/H_k$, небольших инверсионных градиентах, глубинах H_k до 200–250 м в среднем скорости ветра, при которых инверсии разрушаются, соответствуют упомянутой классификации. Однако при увеличении глубины карьеров H_k , уменьшении отношения $(L_n + L_A)/H_k$ (как раз при тех условиях, когда наиболее остро встает проблема внутрикарьерной вентиляции) положение изменяется — разрушения внутрикарьерных инверсий в этом случае требуются поверхностные ветровые потоки довольно большой интенсивности, о чем, впрочем, и свидетельствуют указанные факты для Коркинского угольного разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков К. З., Михайлов В. А. Аэрология карьеров: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1985. — 272 с.
2. Драгунский О. Н. Комплексный подход при формулировании задач аэрологии карьеров. Экология и безопасность обработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — СБ 12. — 76 с.
3. Драгунский О. Н. Некоторые вопросы обеспечения комплексного подхода при постановке задач аэрологии карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — СБ 32. — С. 74–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-32-74-79.

4. Claire Holman, Hugh Datson, Mark Dawson, Rachel McHale, Jon Pullen, Srinivas, Matt Ian Stone, Penny Wilson. Guidance on the Assessment of Mineral Dust Impacts for Planning. The Institute of Air Quality Management. May 2016 (v1.1). London, UK, pp. 1–47.

5. Alfred J. Vella, Renato Camilleri. Fine dust emissions from softstone quarrying in Malta Department of Chemistry, University of Malta. Xjenza, 2005, pp. 47–54.

6. Лабиле-Токпа Ниеба. Обоснование параметров технологии и организации горных работ по разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в условиях тропического климата: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — М.: РУДН, 1994. — 15 с.

7. Alosmanov M. S., Mammadov V. A., Khalilova H. Kh., Bayramov C. M. Development of an Effective Method for Preventing Dust Pollution in Stone Quarries Using Petroleum Refinery Wastes. Journal of Environmental Protection, 06, 2015, p. 1118–1123. DOI: 10.4236/jep.2015.610098.

8. Ogbodo S., Oti M., Okeke A., Okafor C. Pneumoconiosis among quarry workers in a metropolitan town in Southeastern Nigeria, International journal of environmental sciences, Vol. 3, No 5, 2013, pp. 1437–1445. DOI: 10.6088/ijes.2013030500014.

9. Драгунский О. Н. Исследование разрушения инверсий в карьерах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — М.: МГИ, 1978. — 18 с.

10. Гиндин Л. С. и др. Основы динамической метеорологии. — Л.: ГИМИЗ, 1955. — 648 с.

11. Битколов Н. З., Никитин В. С. Условия труда и проветривание карьеров по добыче радиоактивных руд. — М.: Атомиздат, 1978. — 184 с.

12. Ахметов М. С., Искварина З. К. Результаты аэрометеорологических исследований температурного и ветрового режима в Коркинском карьере / Сборник работ Свердловской ГМО, вып. 10. — Свердловск, 1970. — С. 102–105.

13. Куликов В. П., Роголис Ю. П. Проветривание угольных разрезов. — М.: Недра, 1973. — 224 с. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Драгунский Олег Наумович — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: odra@umail.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 2, pp. 14–19.

Destruction of inversions by natural winds inside open pit mines

Dragunskiy O.N., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher, e-mail: odra@umail.ru, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of research undertaken by the Moscow Mining University to study destruction of temperature inversions inside open pit mines. The relevance of the study is governed by the requirement to have more accurate assessment of natural ventilation in deep open pit mines given inversion temperature stratification in mined-out voids. One of the basic research methods was physical simulation. To this effect, it was necessary to ensure similarity of temperature gradients in the model and in the reality. The proper criterion was justified. Physical simulation of destruction of inversions by natural wind flows was carried out in the wind channel at the Institute. The objective was to analyze destruction of inversions by different intensity air flows inside open pit mines of different geometrical dimensions subject to preservation of factors of the inversion gradient. As a result, formulas were obtained for finding natural wind velocities under which destruction of the temperature inversion gradient took place inside an open pit mine. The derived relations were checked using data from special meteorological stations arranged at five open pit mines in the Urals. Processing showed good agreement between the actual data and the results calculated using the obtained formulas. It was also found that the velocities of inversion destruction depend on the value of the temperature inversion gradient in zero wind, on the depth of open pit mines, and on the ratio of open pit mine dimensions on ground surface and along the depth. At the average values of the latter ratio, low inversion gradients and open pit mine depths of 200–250 m, at an

average, the wind velocities under which inversions are destructed comply with the known classification. When the open pit mines are deeper and the mentioned ratio is lower (urgent ventilation conditions inside open pit mines), the situation is different—destruction of temperature inversions requires surface wind flows of higher intensity.

Key words: aerology of open pit mines, meteorology, temperature, physical simulation, similarity criteria, natural ventilation, wind velocity, inversion destruction.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-14-19

REFERENCES

1. Ushakov K.Z., Mikhaylov V.A. *Aerologiya kar'erov*: Uchebnik dlya vuzov [Aerology of the quarries: Textbook for high schools], Moscow, Nedra, 1985, 272 p.
2. Dragunskiy O.N. Kompleksnyy podkhod pri formulirovaniy zadach aerologii kar'erov. Ekologiya i bezopasnost' otrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [An integrated approach in the formulation of aerology quarries. Ecology and safety of mining], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017. Special edition 12, 76 p. [In Russ].
3. Dragunskiy O.N. Nekotorye voprosy obespecheniya kompleksnogo podkhoda pri postanovke zadach aerologii kar'erov [Some of the issues in achieving an integrated approach in the formulation of the objectives of the aerology of quarries], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018. Special edition 32, pp. 74–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-32-74-79. [In Russ].
4. Claire Holman, Hugh Datson, Mark Dawson, Rachel McHale, Jon Pullen, Srinivas, Matt Ian Stone, Penny Wilson. *Guidance on the Assessment of Mineral Dust Impacts for Planning*. The Institute of Air Quality Management. May 2016 (v1.1). London, UK, pp. 1–47.
5. Alfred J. Vella, Renato Camilleri. *Fine dust emissions from softstone quarrying in Malta Department of Chemistry*, University of Malta. Xjenza, 2005, pp. 47–54.
6. Labile-Tokpa Nieba. Obosnovanie parametrov tekhnologii i organizatsii gornyx rabot po razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom v usloviyakh tropicheskogo klimata [Substantiation of parameters of technology and organization of mining works on the mining of mineral deposits by open method in a tropical environment], Candidate's thesis, Moscow, RUDN, 1994, 15 p.
7. Alosmanov M.S., Mammadov V.A., Khalilova H.Kh., Bayramov C.M. Development of an Effective Method for Preventing Dust Pollution in Stone Quarries Using Petroleum Refinery Wastes. *Journal of Environmental Protection*, 06, 2015, p. 1118–1123. DOI: 10.4236/jep.2015.610098.
8. Ogbodo S., Oti M., Okeke A., Okafor C. Pneumoconiosis among quarry workers in a metropolitan town in Southeastern Nigeria, *International journal of environmental sciences*, Vol. 3, No 5, 2013, pp. 1437–1445. DOI: 10.6088/ijes.2013030500014.
9. Dragunskiy O.N. *Issledovanie razrusheniya inversiy v kar'erakh* [Research of destruction of inversions in the open pits], Candidate's thesis, Moscow, MGI, 1978, 18 p.
10. Gindin L.S. *Osnovy dinamicheskoy meteorologii* [Fundamentals of dynamic meteorology], Leningrad, GIMIZ, 1955, 648 p.
11. Bitkolov N.Z., Nikitin V.S. *Usloviya truda i provetrivaniya kar'erov po dobyche radioaktivnykh rud* [Working conditions and ventilation of quarries for the extraction of radioactive ores], Moscow, Atomizdat, 1978, 184 p.
12. Akhmetov M.S., Iskvarina Z.K. Rezul'taty aerometeorologicheskikh issledovaniy temperaturnogo i vetrovogo rezhima v Korkinskom kar'ere [Results of aerometeorological studies of temperature and wind conditions in the Korkinskoye quarry], *Sbornik rabot Sverdlovskoy GMO*, issue 10. Sverdlovsk, 1970, pp. 102–105.
13. Kulikov V.P., Rogalis Yu.P. *Provetrivaniya ugol'nykh razrezov* [Ventilation of coal open pit mines], Moscow, Nedra, 1973, 224 p.

