ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
GIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;5:13-21

УДК 622.4 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21

О РАЗРУШЕНИИ ВНУТРИКАРЬЕРНЫХ ИНВЕРСИЙ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

О.Н. Драгунский

МГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: odra@umail.ru

Аннотация: Наиболее опасными с точки зрения загрязнения карьеров являются температурные инверсии. Предложен метод оценки возможности разрушения инверсий при действии обусловливающих их природных факторов. Метод основан на энергетическом подходе. Его использование показало, что энергия, необходимая для разрушения инверсий в объеме разреза «Восточный» (Экибастуз), и аналогичная энергия, подсчитанная другими исследователями для Коркинского разреза, на несколько порядков выше значений кинетической энергии струй, создаваемых вентиляторами. Для изучения возможности разрушения инверсий в карьерах вентиляторами был проведен лабораторный эксперимент. Масштабный эффект учитывался критериями подобия. Инверсии в моделях создавались подачей на концы нихромовых спиралей напряжений. Нагрев проводился до стабилизации градиента. Далее моделируемыми вентиляторами осуществлялась попытка разрушения инверсии. Нагревательные элементы не отключались, имитируя действия факторов, обусловливающих сохранение инверсии, и при работе вентиляции. Результаты показали неэффективность разрушения инверсий с помощью средств искусственной вентиляции. Полученные выводы проверялись по данным метеостанций Сибайского и Учалинского карьеров, где эксплуатировались мощные установки на базе турбореактивных двигателей. Анализ подтвердил эффективность их работы по удалению загрязненного воздуха, но показал, что величина инверсий не зависела от работы вентиляторов, а отмеченное их разрушение определялось только природными факторами (например, нагревом земной поверхности, усилением ветра и др.). Установлено, что проветривание можно осуществлять и не ставя задачу разрушения инверсий — для глубоких карьеров в случае инверсионного состояния атмосферы указанные средства нужно применять только для выноса, подавления вредностей или перемешивания воздушных масс для снижения их концентраций.

Ключевые слова: аэрология карьеров, глубокий карьер, температура, разрушение инверсий, энергия, искусственная вентиляция, физическое моделирование, критерии подобия, экология, эффективность производства.

Для цитирования: *Драгунский О.Н.* О разрушении внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 13–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.

Breaking inversions in open pit mines using induced ventilation facilities

Dragunskiy O.N

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: odra@umail.ru

Abstract: In open pit mines, temperature inversions are the most hazardous effects from the viewpoint of pollution. In the periods of inversions, down-draught prevails and turbulence weakens, which results in air blanketing. Contaminants accumulate inside open pit mines at concentrations much higher than allowable maximums. In order to estimate preventability of inversion consequences through the change in the temperature gradient, it is required to calculate the required energy for transition of open pit air to adiabaticity. To this effect, we propose a method of assessing feasibility of breaking inversions under action of conditional natural factors. The method uses an energy-based approach. The method application shows that energy required for breaking inversions in Vostochny open pit mine (Ekibastuz) and the calculated energy for the same purpose in Korkino open pit mine exceed by a few orders of magnitude the kinetic energy of fan blasts. Aimed to determine breakability of inversions in open pit mines by fans, a laboratory-scale experiment was carried out. The scale effect was taken into account using similarity criteria. Inversions were simulated by voltage supply to ends of nichrome curls. Heating was maintained until stabilization of the gradient. Then, model fans tried to break inversion. The heating elements were energized during operation of the fans to simulate action of factors that conditioned inversion. The results proved inefficiency of breaking inversions with the induced ventilation facilities. The test results were checked using the data of weather stations at Sibai and Uchaly open pit mines operating powerful turbo-jet installations. The analysis confirmed their efficiency in polluted air removal although the value of inversions was independent of the fan operation and inversions were only broken due to natural factors (e.g., ground surface heating, wind strengthening, etc.). Thus, it is found that in deep open pit mines under inversions, induced ventilation fails to break inversion, and can only be used for removal and suppression of contaminants, or for air agitation intended to decrease their concentration.

Key words: Open pit mine aerology, deep open peat mines, temperature, inversion breaking, energy, induced ventilation, physical simulation, similarity criteria, ecology, production efficiency.

For citation: Dragunskiy O. N. Breaking inversions in open pit mines using induced ventilation facilities. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;5:13-21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-13-21.

Введение

Проблемам загрязнения атмосферы карьеров и методам ее нормализации посвящено множество работ как российских, так и иностранных исследователей (см. например, [1—9]). Установлено, что наиболее опасными явлениями с этой точки зрения являются внутрикарьерные температурные инверсии. В период инверсий преобладают нисходящие потоки воздуха, а также уменьшается турбулентный обмен, что приводит к застою воздуха в выработанном пространстве. При этом выделяющиеся в карьере вредности (пыль, газы) накапливаются в его объеме, и их концентрации часто превышают предельно допустимые. Таким образом, установившийся инверсионный градиент в карьере можно считать одной из главных причин его загрязнения.

Вполне естественно поэтому, что возник вопрос: а нельзя ли предотвратить опасные последствия инверсий, воздействуя непосредственно на их причину, то есть изменяя температурный градиент? Для этого необходимо было подсчитать количество энергии, которую следует потратить, чтобы перевести атмосферу карьера из инверсионного в адиабатическое состояние. Однако анализ методов оценки возможности такого перевода показал, что они не учитывают всех происходящих изменений микроклиматических параметров атмосферы выработанного пространства при разрушении инверсий, необходимости сведения всех энергозатрат в объем карьера, «разомкнутости» карьерного пространства, мощности природных факторов, обусловливающих наличие инверсии, временного фактора, то есть изменения температурного градиента в течение суток. В связи с этим был предложен метод оценки возможности разрушения инверсий при действии обусловливающих их природных факторов в карьерах, основанный на сравнении величины разности сумм потенциальной и внутренней энергий воздуха, находящегося в выработанном пространстве, при инверсионном и адиабатическом состояниях его атмосферы с величиной кинетической энергии массы воздуха, заключенной в объеме турбулентной струи, создаваемой установками проветривания [10].

Формула для расчета указанной разности была выведена на основе известных выражений для потенциальной и внутренней энергии для столба воздуха конечной толщины. Далее, в связи с целесообразностью сведения при расчетах всей энергии, затрачиваемой на изменение температурного градиента, непосредственно на внутрикарьерные массы воздуха, в качестве граничных условий было принято постоянство микроклиматических характеристик (температуры, плотности воздуха и давления) на верхней границе выработанного пространства. Используя барометрическую формулу Бабинэ [11], для карьера, аппроксимированного прямоугольным параллелепипедом, было получено выражение для расчета величины разности суммы потенциальной и внутренней энергии воздуха, находящегося в выработанном пространстве, при его инверсионном и адиабатическом состояниях:

$$\Delta E_{вп} = S\left[3{,}5 \cdot p_п \left(\frac{H_к^2}{\alpha + \beta_и \cdot H_к} + H_к\right) - 3{,}5 \cdot p_п \left(\frac{H_к^2}{\alpha + \beta_а \cdot H_к} + H_к\right)\right], \quad (1)$$

где $\alpha = 16\,000 + 58{,}6 \cdot t_п$; $\beta_и = 29{,}3\gamma_и - 1$; $\beta_а = 29{,}3\gamma_а - 1$; $H_к$ — глубина карьера; $\gamma_и$ и $\gamma_а$ — соответственно инверсионный и адиабатический температурные градиенты; $p_п$ и $t_п$ — соответственно давление и температура на поверхности карьера; S — площадь основания параллелепипеда, аппроксимирующего карьер.

Для экибастузского разреза «Восточный» на период освоения проектной мощности ($H_к$ = 70 м) и на 16-й год его эксплуатации ($H_к$ = 190 м) были вычислены значения $\Delta E_{вп}$. Величина $\Delta E_{вп}$, при $H_к$ = 70 м, составляла для этих условий от 0,4 до 2,0 ГДж при изменении инверсионного градиента температуры от –0,02 до –0,1 °С/м, что на 2 порядка меньше значений $\Delta E_{вп}$ при $H_к$ = 190 м.

Существующие методы расчета количества средств искусственной вентиляции, необходимых для разрушения инверсий, базируются на делении так или иначе подсчитываемой энергии, характеризующей температурную стратификацию и аналогичной $\Delta E_{вп}$, на мощность конкретной вентиляционной установки. Однако, при этом не учитывается, что инверсионное состояние атмосферы карьера устанавливается под воздействием вполне конкретного природного фактора (например, радиационного выхолаживания поверхностей постоили адвекции теплых масс воздуха) или совокупности факторов. Естественно предположить, что этот природный фактор обладает определенной мощностью, расходуемой на поддержание атмосферы выработанного пространства в инверсионном состоянии, причем энергия $\Delta E_{вп}$ как раз и будет характеризовать действие этой мощности в объеме карьера. Поэтому для ответа на вопрос о возможности разрушения инверсий в карьерах средствами искусственной вентиляции необходимо сравнивать величину $\Delta E_{вп}$ с энергией (обозначим ее $E_к$), которая характеризовала бы действие данного средства по разрушению инверсионного градиента также в объеме карьера. Поскольку известно, что энергией, определяющей возможность искусственного разрушения инверсий, является кинетическая энергия, за энергию $E_к$ в первом приближении можно взять кинетическую энергию части турбулентной струи, создаваемой установкой проветривания, приходящейся на объем выработанного пространства.

На основе метода расчета осесимметричных струй, предложенного В.А. Бахаревым [12], было выведено выражение для определения $E_к$ в зависимости от начального диаметра струи d_0, начальной скорости выпуска воздуха v_0, расстояния от вентиляционной установки x:

$$E_к = 10\,890 \cdot \pi \cdot \rho \cdot a^2 \cdot v_0^{\,2} \cdot d_0^{\,3} \cdot$$
$$\cdot (1 - e^{-6{,}4516}) \cdot (1 - e^{-0{,}002 \cdot x/d_0}), \qquad (2)$$

где a — коэффициент турбулентной структуры струи, ρ — плотность воздуха.

По формуле (2) рассчитывались значения кинетической энергии массы воздуха, заключенной в объеме создаваемой струи, для конкретных установок проветривания карьеров: АИ-20КВ, НК-12КВ, АВК-5 и ПВУ-6. Значения $E_к$ в МДж приведены в таблице. Заметим, что по формуле (2) были рассчитаны значения $E_к$ при изменяющихся d_0 от 5 до 40 м, скорости воздуха v_0 от 20 до 120 м/с и расстоянии x от 100 до 500 м.

Сравнение энергии $E_к$ конкретных вентиляционных установок с энергией $\Delta E_{вп}$, подсчитанной для вышеупомянутого разреза «Восточный», а также с аналогичными $\Delta E_{вп}$ энергиями, подсчитанными различными методами другими исследователями для условий Коркинского угольного разреза, показало, что при глубинах карьеров более 100 м значения $\Delta E_{вп}$ (и аналогичных энергий) на несколько порядков (2—3 и более) выше значений $E_к$ даже при низких инверсионных градиентах. Следует также отметить, что при таких больших значениях параметров вентиляционной установки на выходе, как d_0 = 40 м и v_0 = 120 м/с (в этом случае начальная мощность струи равна более 1,3 млн кВт), энергии $E_к$, равной 1,5—7,5 ГДж при x от 100 до 500 м, не хватит, чтобы разрушить инверсионное состояние атмосферы карьеров глубиной более 100 м.

Отсюда был сделан вывод: для глубоких карьеров при наличии природных факторов, поддерживающих внутрикарьерный инверсионный градиент температуры, разрушение инверсий средствами искусственной вентиляции является нерациональным ввиду необходимости применения больших энергетических затрат.

Для изучения возможности разрушения инверсионного температурного градиента в карьере средствами искусственной вентиляции был проведен соответствующий лабораторный эксперимент. Инверсионное состояние атмосферы карьеров моделировалось тепловым

Кинетическая энергия части турбулентных струй, создаваемых установками проветривания и приходящихся на внутрикарьерное пространство, МДж
The kinetic energy part of the turbulent jets generated by the installations of ventilation, falling on the career space, MJ

Установка проветривания	Начальная скорость выпуска воздуха, v_0, м/с	Начальный диаметр струи, d_0, м	Расстояние от вентиляционной установки, x, м				
			100	200	300	400	500
АИ-20КВ	40,0	4,50	3,377	6,606	9,695	12,649	15,475
НК-12КВ	52,5	5,60	6,272	12,324	18,164	23,799	29,235
АВК-5	12,5	35,00	20,233	40,556	60,665	80,644	100,518
ПВУ-6	110,0	1,80	1,757	3,329	4,736	5,995	7,121

способом путем нагрева нихромовых спиралей, протянутых над моделью карьера по направлению воздушного потока. Измерения температуры производились при помощи термометров сопротивления. Температурные датчики были соединены в единую электрическую цепь и располагались равномерно по всему объему моделируемого карьерного пространства. Модели карьеров выполнялись из пенопластовых блоков.

Различные инверсионные температурные градиенты в моделях карьеров создавались подачей через лабораторные трансформаторы на концы нихромовых спиралей различных напряжений. Нагрев спиралей осуществлялся до стабилизации внутрикарьерного температурного градиента. Время нагрева колебалось от 30 до 70 мин.

Далее моделируемыми средствами искусственной вентиляции осуществлялась попытка разрушения установленного инверсионного градиента. При этом нагревательные элементы (спирали) не отключались, имитируя продолжение действия природных факторов, обусловливающих сохранение инверсии и при действии средств искусственной вентиляции.

Средства искусственной вентиляции моделировались трубками различного диаметра, в которые воздух подавался с помощью воздуходувки, расход воздуха при этом измерялся газовым счетчиком. Диаметр трубок изменялся от 0,006 до 0,016 м. Моделировалось как верхнее, так и нижнее расположение вентиляционных установок. При верхнем расположении угол наклона установки к горизонтальной плоскости составлял 30°. Его выбор был обусловлен требованием наилучшего развития струи в выработанном пространстве. При нижнем расположении установки моделировалось вертикальное направление струи.

Указанное моделирование осуществлялось для модели карьера округлой формы глубиной $H_к$ = 0,55 м и отношением его длины по поверхности к глубине 1,81.

Подобие температурных градиентов в карьере осуществлялось соблюдением равенства критерия m:

$$m = (\gamma_н \cdot L_н)/T_н = (\gamma_л \cdot L_л)/T_л = \text{idem}, \quad (3)$$

где $L_н$, $L_л$ — характерный линейный размер карьера в натуре и модели; $\gamma_н$, $\gamma_л$ — температурный градиент в карьере в натуре и модели; $T_н$, $T_л$ — характерная температура в натуре и модели.

Применение критерия m было обосновано д.т.н. В.В. Силаевым для случая адиабатического температурного градиента $\gamma_а$, он же высказал предположение о применимости этого критерия при моделировании и других температурных градиентов. В работе [10] обосновано это предположение, а также показано, что для моделирования процесса разрушения инверсии средствами искусственной вентиляции соблюдение критерия Рейнольдса необходимо только в начальном сечении создаваемой вентилятором турбулентной струи. Автомодельность моделируемого процесса, обеспеченная проведением экспериментов в диапазоне чисел Рейнольдса от 5000 до 13 500 (v_0 изменялась от 5 до 35,7 м/с), позволила производить моделирование по равенству средних скоростей. Температурный градиент при штиле в модели в отсутствие воздействия средства искусственного проветривания был в пределах от 4,31 °С/м до 16,6 °С/м, что в пересчете для карьера глубиной 250 м составляет от 0,0095 °С/м до 0,0365 °С/м.

Результаты лабораторных экспериментов показали неэффективность разрушения общекарьерного инверсионного градиента с помощью средств искусственной вентиляции — как при нижнем, так и при верхнем расположении модельных вентиляционных установок инверсионный градиент не разрушался, то есть разрушение инверсий при наличии факторов, способствующих их сохранению, карьерными вентиляторами практически трудноосуществимо, так как требует чрезвычайно больших затрат энергии.

Проверка выводов о целесообразности применения средств искусственной вентиляции для разрушения внутрикарьерных инверсий была осуществлена на основании метеорологических данных специальных метеостанций Сибайского карьера Башкирского медно-серного комбината и карьера Учалинского ГОКа. На них эксплуатировались установки ПРВУ-РД-3М и УВУ на базе турбореактивных двигателей мощностью соответственно 22 100 и 29 400 кВт и начальным диаметром создаваемых струй 0,87 и 1,15 м (с начальной скоростью 410 и 455 м/с). Дальнобойность струй, создаваемых этими установками (до сечения со скоростью 0,6 м/с), достигала 350—400 м. Эксплуатация этих установок велась при углах наклона оси их двигателей к горизонту в пределах от –15 до +15°. При этом, вследствие наличия архимедовых объемных сил, струи, создаваемые указанными установками, искривляются и приобретают вертикальное направление движения, которое, как известно, в наибольшей степени способствует разрушению инверсионного температурного градиента.

К рассмотрению принимались случаи работы этих установок при инверсиях температуры — всего 109 случаев (Сибайский карьер — 78 случаев, Учалинский — 31 случай). Анализ подтвердил эффективность работы установок на удаление загрязненного воздуха из карьеров в целом или их отдельных зон. Так, для Сибайского карьера количество случаев, когда загрязненный воздух удалялся под действием искусственной вентиляции, составляло 65% от рассмотренных, для Учалинского — 77,5. Больший процент в последнем случае объясняется, по всей видимости, меньшей глубиной Учалинского карьера в рассматриваемый период ($H_к$ = 106—108 м) по сравнению с Сибайским ($H_к$ = 184—264 м), а, следовательно, — большей возможностью выноса вредностей за счет действия искусственно создаваемых вентиляционных струй.

Наряду с этим анализ показал, что величина инверсионного температурного градиента практически не зависит от работы вышеуказанных установок. При этом даже периодическое разрушение инверсии при их работе определялось исключительно природными факторами.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ показал, что проветривание карьеров в целом или их отдельных рабочих зон можно успешно осуществлять и не ставя задачу разрушения внутрикарьерных инверсий. Здесь вполне уместно привести высказывание канадского инженера О Боулэнда (Owen B. Boland) о том, что атмосферные условия сами не производят пыль, однако такие ситуации, как инверсии, ухудшают состояние атмосферы при пылеобразующих процессах [13]. Очевидно, что загрязнение выработанного пространства и образование инверсионного температурного градиента — разные физические явления. Конечной же целью искусственного проветривания является обеспечение нормального санитарно-гигиенического состояния атмосферы, а отнюдь не установление адиабатического градиента температуры в карьере.

Натурные эксперименты, проведенные рядом исследователей (см., например, работы [14—16], а также их анализ, показали, что в отдельные периоды времени при определенных условиях (отсутствие природных факторов, обусловливающих поддержание инверсионного градиента, небольшая глубина карьеров) возможна интенсификация естественного разрушения внутрикарьерных инверсий средствами искусственной вентиляции.

Однако для глубоких карьеров, как показали наши исследования, в случае инверсионного состояния атмосферы указанные средства можно и нужно применять, но исключительно для выноса вредностей (пыли, газов) за пределы выработанного пространства, либо их подавления при орошении водой или твердыми осадками (снегом), а также, возможно, для перемешивания воздушных масс карьера с целью снижения концентрации этих вредностей [9].

Указанные способы нормализации состава атмосферы карьеров, тем не менее, иногда могут «вступать в определенное противоречие» с целями и задачами как экологической защиты населения, так и с мерами по повышению эффективности производства. Пути решения этих противоречий изложены, в частности, в работах [17—19]. В свою очередь, пересмотр целей аэрологии карьеров как науки, направленной на комплексное решение проблем производственной деятельности, зависящих от состояния параметров атмосферы выработанного пространства, позволит рационально подходить к решению многих возникающих задач горного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ушаков К.З., Михайлов В.А.* Аэрология карьеров: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1985. — 272 с.

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

3. *Куликов В.П., Рогалис Ю.П.* Проветривание угольных разрезов. — М.: Недра, 1973. — 224 с.

4. *Каледина Н.О. и др.* Аэрология карьеров. Практикум для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов. — М.: МГГУ, 2012. — 64 с.

5. *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, pp. 1118—1123. DOI: 10.4236/jep.2015.610098

6. *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.

7. *Alfaro Degan G., Lippiello D., Pinzari M.* Occupational hazard prevention and control in a quarry environment: exposure to airborne dust. WIT transactions on the built environment. Vol. 151. 2015, Southampton, UK, pp. 27—38. DOI 10.2495/SAFE150031.

8. *Korshunov G., Kovshov S., Safina A.* Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical and chemical research. Ecology, Environment and Conservation Paper, New Delhi, India, Vol. 23, Issue 2, 2017, pp. 883—889.

9. *Halwenge, Jennifer Atieno*. Dust pollution and its health risks among rock quarry workersin kajiado county, Kenya. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Environmental Science in the School of Environmental Studies of Kenyatta University. Nairobi. 2015. 80 p.

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

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

12. *Бахарев В.А.* К теории и расчету свободных турбулентных струй / Теория и расчет вентиляционных струй. — Л., 1965. — С. 12—26.

13. Owen B. Boland. Dust control and ventilation in an open pit iron mine // Canadian Mining Journal, October, 1965, pp. 72—75.

14. *Битколов Н.З. и др.* Экспериментальная проверка и обоснование схемы искусственного проветривания карьеров производственного объединения Каратау // Горный журнал. — 1976. — № 7. — С. 22—25.

15. *Филатов С.С. и др.* Установки для вентиляции карьеров вертикальными струями // Цветная металлургия. — 1971. — № 13. — С. 12—14.

16. *Конорев М.М., Нестеренко Г.Ф., Павлов А.И.* Вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров. — Екатеринбург: УрО РАН, 2010. — 440 с.

17. *Драгунский О.Н.* Комплексный подход при формулировании задач аэрологии карьеров. Экология и безопасность отработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — СВ 12. — 76 с.

18. *Драгунский О.Н.* Некоторые вопросы обеспечения комплексного подхода при постановке задач аэрологии карьеров. Безопасность и экология горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — СВ 32. — С. 74—79. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-32-74-79.

19. *Косолапов А.И., Малофеев Д.Е., Кузнецов Д.В.* К вопросу оценки интенсивности горных работ при разработке месторождений в суровых климатических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 2. — С. 35—41. ГИАБ

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. Bitkolov N.Z., Nikitin V.S. *Usloviya truda i provetrivanie kar'erov po dobyche radioaktivnykh rud* [Working conditions and ventilation of quarries for the extraction of radioactive ores], Moscow, Atomizdat, 1978, 184 p.

3. Kulikov V.P., Rogalis Yu.P. *Provetrivanie ugol'nykh razrezov* [Ventilation of coal open pit mines], Moscow, Nedra, 1973, 224 p.

4. Kaledina N.O. *Aerologiya kar'erov*. Praktikum dlya provedeniya prakticheskikh zanyatiy i samostoyatel'noy raboty studentov [Aerology of the quarries. Workshop for practical training and independent work of students], Moscow, MGGU, 2012, 64 p.

5. 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, pp. 1118—1123. DOI: 10.4236/jep.2015.610098.

6. 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.

7. Alfaro Degan G., Lippiello D., Pinzari M. *Occupational hazard prevention and control in a quarry environment: exposure to airborne dust. WIT transactions on the built environmen*t. Vol. 151. 2015, Southampton, UK, pp. 27—38. DOI 10.2495/SAFE150031.

8. Korshunov G., Kovshov S., Safina A. Dust control methods in open-pit mining. Current state of physical and chemical research. *Ecology, Environment and Conservation Paper*, New Delhi, India, Vol. 23, Issue 2, 2017; pp. 883—889.

9. Halwenge, Jennifer Atieno. *Dust pollution and its health risks among rock quarry workersin kajiado county, Kenya*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Environmental Science in the School of Environmental Studies of Kenyatta University. Nairobi. 2015. 80 p.

10. 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.

11. Gindin L.S. *Osnovy dinamicheskoy meteorologii* [Fundamentals of dynamic meteorology], Leningrad, GIMIZ, 1955, 648 p.

12. Bakharev V.A. On the theory and calculation of free turbulent jets. *Teoriya i raschet ventilyatsionnykh struy* [Theory and calculation of ventilation jets], Leningrad, 1965, pp. 12—26.

13. Owen B. Boland. Dust control and ventilation in an open pit iron mine. *Canadian Mining Journal*, October, 1965, pp. 72—75.

14. Bitkolov N.Z. Experimental verification and substantiation of the scheme of artificial airing of quarries of Karatau Production Association. *Gornyy zhurnal*. 1976, no 7, pp. 22—25. [In Russ].

15. Filatov S.S. The installation of ventilation pits vertical jets. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1971, no 13, pp. 12—14. [In Russ].

16. Konorev M.M., Nesterenko G.F., Pavlov A.I. *Ventilyatsiya i pylegazopodavlenie v atmosfere kar'erov* [Ventilation and dust and gas suppression in the atmosphere of quarries], Ekaterinburg, UrO RAN, 2010, 440 p.

17. Dragunskiy O.N. 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].

18. Dragunskiy O.N. 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].

19. Kosolapov A.I., Malofeev D.E., Kuznetsov D.V. On the issue of assessing the intensity of mining operations in the development of fields in harsh climatic conditions. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 2, pp. 35—41. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ «ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР–ЭЛЕКТРОПРИВОД»

(№ 1183/05–19 от 16.04.2019; 27 с.)

Дмитриева Валерия Валерьевна[1] — кандидат технических наук, доцент,
Фролова Анна Юрьевна — магистр, инженер, e-mail: kin4eva@yandex.ru, МГИ НИТУ «МИСиС»,
Прищепенков Сергей Андреевич[1] — студент, e-mail: sergey_a_p@icloud.com,
[1] РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

Предложены математические модели шахтного ленточного конвейера и асинхронного частотно-управляемого привода. Для разработки модели движения конвейерной ленты выполнена аппроксимация распределенного объекта пятью сосредоточенными массами. В качестве основного математического аппарата использовано уравнение Лагранжа второго рода; модель выполнена в «пространстве состояний». Модель привода выполнена в виде двухканальной системы подчиненного регулирования, в каждом канале рассчитаны регуляторы токов, а также потокосцепления и скорости вращения ротора. Выполнено корректное объединение моделей. Разработанные модели рассчитаны на применении в системах автоматического регулирования скорости движения несущего полотна конвейера в зависимости от поступающего грузопотока.

Ключевые слова: математическое моделирование, ленточный конвейер, асинхронный двигатель, частотно-векторное управление, управление скоростью движения ленты конвейера.

DESIGN OF AN INTEGRATED MODEL «BELT CONVEYOR — ELECTRIC DRIVE»

V.V. Dmitrieva[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
A.Yu. Frolova, Magister, Engineer, e-mail: kin4eva@yandex.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,
S.A. Prishepenkov[1], Student, e-mail: sergey_a_p@icloud.com,
[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 119991, Moscow, Russia.

The article offers mathematical models of mine belt conveyor and asynchronous frequency-controlled drive. To develop a model of the conveyor belt motion, the approximation of the distributed object by five concentrated masses is performed. The Lagrange equation of the second kind is used as the main mathematical apparatus. The model is made in the «state space». The drive model is made in the form of a two-channel system of subordinate regulation, in each channel current regulators, as well as flow coupling and rotor speed are calculated. The correct combination of models was performed. The developed mathematical models are designed for use in systems of automatic control of the speed of the carrier conveyor belt, depending on the incoming traffic.

Key words: mathematical modeling, belt conveyor, asynchronous drive, vector drive control, automatic control system of conveyor belt speed, Simulink.