

4. Макушок Е.М. Самоорганизация деформационных процессов // Е.М. Макушок – Минск: Наука и техника, 1999. – 272 с.
5. Васильев, Д.Л. Совершенствование метода расчёта предела прочности горных пород при одноосном сжатии / Д.Л. Васильев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 108. – С. 199-106.
6. Грицко, Г.И. Экспериментально–аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. / Г.И. Грицко, Б.В. Власенко – Новосибирск: Наука, 1976. – 188 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Самусей В.І.  
Надійшла до редакції 03.11.2014*

УДК 504.3.054

© В.А. Зберовский

## **МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ**

Разработана методика расчёта концентрации выхлопных газов в атмосфере при эксплуатации автотранспортных средств в карьере и на прилегающей к нему территории, которая учитывает криволинейность осевой линии факела распространения вредности от источника путем ее аппроксимации линией тока воздушного потока, проходящей через источник вредности, что повышает точность расчёта и позволяет учесть сложный урборельеф территории.

Розроблено методику розрахунку концентрації вихлопних газів в атмосфері при експлуатації автотранспортних засобів в кар'єрі і на прилеглий до нього території, яка враховує криволінійність осьової лінії факела поширення шкідливості від джерела шляхом її апроксимації лінією струму повітряного потоку, що проходить через джерело викиду, що підвищує точність розрахунку і дозволяє врахувати складний урборельєф території.

Developed a method for calculating the concentration of exhaust gases in the atmosphere at eksplua-tation vehicles in career and the surrounding area, which takes into account the curvilinear center line in the plume spread hazard from the source by its approximation streamline airflow passing through the source of the harm-that improves the accuracy of the calculation and allows to consider complex urborelef territory.

**Введение.** Карьерные автосамосвалы и большегрузные дизельные грузовые технологические автомобили являются интенсивными передвижными источниками загрязнения воздуха продуктами сгорания дизельного топлива. Количество одновременно эксплуатируемых автотранспортных средств в карьере и на прилегающей к нему территории может достигать 400–500 автомобилей, что приводит к повышению концентрации вредных веществ в атмосфере окружающей среды. Выхлопные газы дизельных автосамосвалов представляют сложную многокомпонентную смесь в состав которой входят такие токсичные вещества как: окись углерода, углеводородные соединения, альдегиды, окислы азота, диоксид серы, твердые частицы сажи, а также полициклические ароматические

углеводороды, наиболее активным из которых является канцерогенное вещество – бензапирен.

Сложный рельеф карьера и прилегающей в радиусе 1–5км территории окружающей среды с отвалами горных пород, хвостохранилищами, дамбами, гидросооружениями и селитебной зоной с застройками жилых районов делает задачу расчёта загрязнения атмосферы выхлопными газами автомобилей традиционными методами чрезвычайно сложной и очень приближенной. Наибольшую сложность в расчётах загрязнения атмосферы представляет расчёт поля концентрации от передвижных источников, в частности карьерных автосамосвалов и дизельного грузового большегрузного технологического автотранспорта.

В этой связи исследования загрязнения атмосферы выхлопными газами при эксплуатации дизельных карьерных автосамосвалов является актуальной научно-практической задачей, которая относится к перечню приоритетных направлений развития науки и техники до 2020 года (п.4 «Рациональное природопользование», Закон Украины от 12.10. 2010 № 2519-VI) и совпадает с перечнем приоритетных тематических направлений научных исследований и научно-технических разработок на период до 2015 года по направлению «Технология очистки и предотвращения загрязнения атмосферного воздуха», утвержденных Постановлением КМУ от 07.09.2011 г. № 942.

**Формулировка цели исследований.** Цель работы – повышение эффективности расчётов загрязнения атмосферы вредными выхлопными газами при эксплуатации карьерных автосамосвалов и дизельного грузового большегрузного технологического автотранспорта с учетом сложного урборельефа территории.

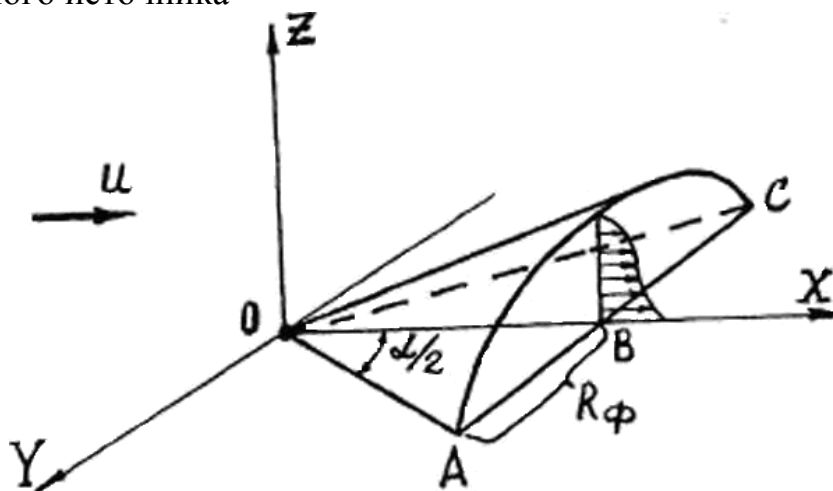
**Изложение основного материала исследований.** Математическое моделирование при изучении состояния атмосферы в карьерах и окружающей среде является важнейшей составной частью научно-исследовательских и практических задач защиты атмосферы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. При теоретических расчётах и прогнозе загрязнения атмосферы должны учитываться гидрометеорологические и климатические факторы, технологические условия и особенности горного производства, наличие современных технических средств нейтрализации выхлопных газов и геоинформационное обеспечение при эксплуатации горнотранспортного оборудования на карьерах. Например, применение ГИС-технологий и радионавигационных систем на транспорте, позволяет с достаточной точностью в реальном масштабе времени получать цифровую информацию о метеоданных, определять местоположение и скорость автотранспортных средств, вес перевозимого груза, текущий расход топлива, интенсивность пыли и газовой выделений, режим нагрузки двигателя и т.д., автоматически передавать эти данные в диспетчерский центр для накопления, обработки и последующего применения при решении задач контроля чистоты атмосферы в карьере и окружающей среде.

Известно, что общая загазованность атмосферы на любой территории складывается из наслаивающихся друг на друга составляющих, обусловленных первичным фоном, а также площадными, линейными и точечными стационар-

ными и передвижными источниками вредностей. Таким образом, прогноз газовой обстановки в атмосфере в целом базируется на расчете составляющих концентраций вредностей в произвольной точке пространства от всех площадных, точечных и линейных источников, факелы распространения вредностей которых проходят через эту точку. Учитывая, что, в первом приближении, дороги по которым двигаются большегрузные карьерные автосамосвалы являются квазистационарным источником вредностей, то весь серпантин дорог можно рассматривать как совокупность отдельных, сравнительно прямолинейных участков линейных источников вредностей.

Теоретические схемы факела распространения вредностей на плоскости, согласно [1, 2], приведены на рис. 1.

А) от точечного источника



Б) от линейного источника

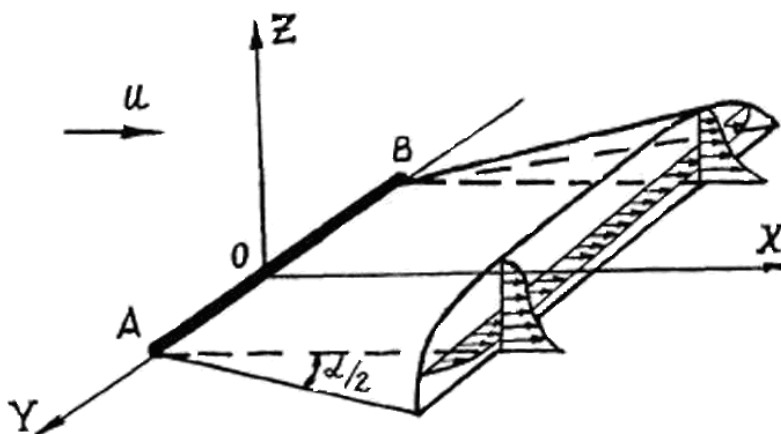


Рис. 1. Теоретические схемы факела распространения вредностей на плоскости

Известные расчетные зависимости были получены для условий распределения теоретических факелов вредностей на плоскости при прямолинейной оси факела, при этом концентрация газа в произвольной точке факела с координатами  $x, y, z$  может быть определена по следующим формулам [1, 2].

а) для точечного источника

$$C = \frac{kG}{x^2 \psi_{гр}^2 u} \exp \frac{-6,3 \sqrt{(y^2 + z^2)}^{1,3}}{\psi_{гр} x^{1,3}} + C', \text{ мг/м}^3 \quad (1)$$

б) для линейного источника

$$C = \frac{kG}{x^2 \psi_{гр}^2 L_{и} u} \exp \frac{-3,9 z^2}{\psi_{гр} x^2} + C', \text{ мг/м}^3, \quad (2)$$

где,  $k$  – экспериментальный безразмерный коэффициент пропорциональности, который при прямоточной схеме проветривания для источников вредностей, расположенных над поверхностью уступа, принимается  $k = 3$ ;  $G$  – интенсивность источника вредностей, мг/с;  $u$  – скорость воздушного потока у точечного или средняя по длине линейного источника, м/с;  $L_{и}$  – длина линейного источника, м;  $C'$  – концентрация вредности в воздухе, поступающем к источнику (фон), мг/м<sup>3</sup>;  $\psi_{гр}$  – тангенс угла раскрытия факела распространения вредностей  $\alpha$ ; рассчитывается по эмпирической формуле:

$$\psi_{гр} = \text{tg } \alpha = k' \frac{u}{u_1} + b,$$

здесь  $k'$  и  $b$  – безразмерные коэффициенты, которые при прямоточной схеме проветривания для источников, расположенных над поверхностью уступа, принимаются  $k' = b = 0,5$ ;  $u_1$  – минимальная скорость воздушного потока, при которой аэродинамические силы преобладают над термическими:  $u_1 = 1$  м/с.

В формулах (1) и (2) не учитывается влияние турбулентности и рельефа территории, а также криволинейность и флуктуация осевой линии факела распространения вредностей в атмосфере, что снижает точность расчётов концентрации вредностей, особенно у подстилающей поверхности, где влияние турбулентности и урборельефа особенно велико.

Так как при установившемся движении линии тока совпадают с траекториями газовых частиц, то распространение вредных примесей в атмосфере принято таким, при котором ось факела вредности совпадает с линией тока воздушного потока, проходящего через источник вредностей.

С учетом такой постановки задачи, при наличии цифровых карт и планов автодорог местности, а также оборудования автотранспортных средств приборами GPS предложена следующая методика расчёта поля концентраций выхлопных газов в атмосфере от каждого источника вредностей с учетом наложения газовых факелов в зоне их распространения. За расчетную предложена схема факела распространения вредностей в атмосфере согласно рис. 2.

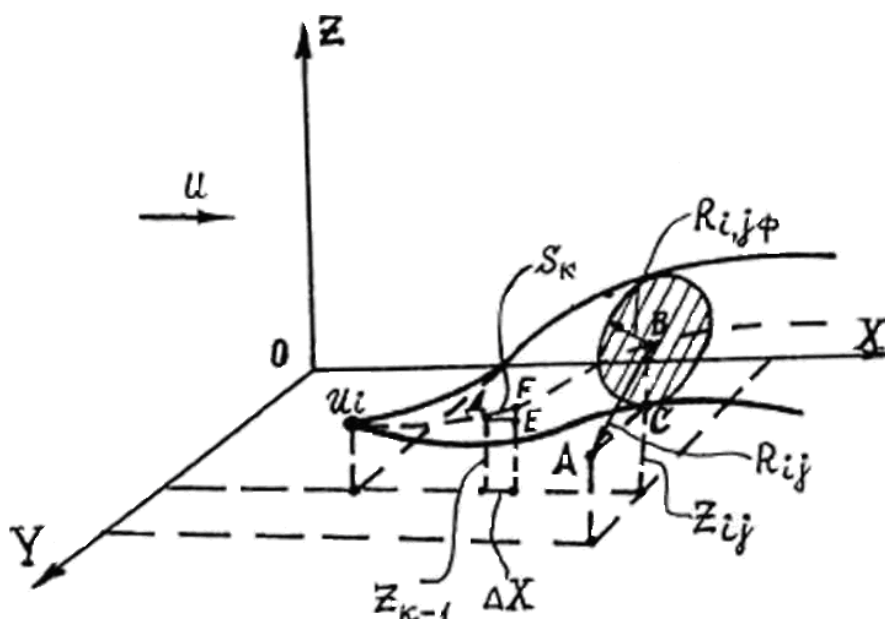


Рис. 2. Расчетная схема факела распространения вредных газов в атмосфере

Основные положения методики расчёта концентрации выхлопных газов в атмосфере при эксплуатации автотранспортных средств в карьере и на прилегающей к нему территории заключается в следующем:

1. Автодорога условно разбивается на прямые и криволинейные отрезки, с выделением характерных точек отрезков дороги с разными уклонами, кривизной, конструкцией дорожного покрытия и т.д.. Массив этих точек формируется как база данных и хранится в ПЭВМ для обработки исходной информации и дальнейших расчетов;

2. Определяется тип схемы естественного проветривания карьера по каждому румбу розы ветров и фоновая концентрация вредностей в карьере от внешних источников, расположенных на подветренной стороне карьера;

3. С использованием цифровой модели территории в заданный момент времени определяется скорость и направление ветрового потока в любой характерной точке автодороги и строится поле скоростей по следующей методике:

а) План территории с нанесенными на него источниками вредности заданной интенсивности помещается в первый квадрат координатной плоскости XOY таким образом, чтобы направление оси абсцисс совпадало с направлением ветрового потока (рис. 2).

б) Нумеруются точечные источники вредности от  $i = 1$  до  $i = n$  и определяются их координаты.

в) Нумеруются расчетные точки карьерного пространства, концентрации вредностей в которых необходимо вычислить, от  $j = 1$  до  $j = m$  и определяются их координаты.

г) Используя программу расчета прямого обтекания карьера [3], определяются скорости воздушного потока у точечных источников  $u_i$  и аппликаты  $Z_k$  точек линий тока, исходящих из источников. При этом точки на линиях тока выбираются с равным интервалом по оси абсцисс  $\Delta x = x_k - x_{k-1}$  от источника до

границы заданной территории в соответствующем сечении так, что всем точкам одной и той же линии тока соответствует одна и та же ордината источника  $y_i$ .

д) Для каждой расчетной точки производится проверка всех имеющихся источников на соблюдение поочередно двух критериев. Первый критерий имеет вид

$$x_j > x_i \quad (3)$$

и выполняется для источников, находящихся до расчетной точки по ходу ветра. Второй критерий имеет запись

$$R_{ij} < R_{\phi ij} \quad (4)$$

и выполняется для источников, в факелы вредности которых попадает расчетная точка. При этом, согласно рис. 2,  $R_{ij}$  – расстояние от  $j$ -й точки до осевой линии факела  $i$ -го источника, м;  $R_{\phi ij}$  – радиус поперечного сечения факела  $i$ -го источника, проведенного через  $j$ -ю точку (радиус действующего сечения факела), м.

Для расчета  $R_{\phi ij}$  используем полученное из треугольника АОВ (см. рис. 1а) соотношение  $R_{\phi ij} = (x_j - x_i) \operatorname{tg}(\alpha_i/2)$ , а для расчета  $R_{ij}$  – соотношение,

следующее из треугольника АВС (см. рис. 2),  $R_{ij} = \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (Z_j - Z_{ij})^2}$ ,

где  $Z_{ij}$  – аппликата центра поперечного сечения  $i$ -го факела, проходящего через  $j$ -ю точку. Величину  $Z_{ij}$  определяем посредством интерполяции заданной таблично зависимости аппликат точек  $i$ -го факела от их абсцисс  $Z_{\phi i}$  ( $x_{\phi i}$ ) для значения  $x_{\phi i} = x_j$ .

е) Если критерий (3), а затем критерий (4) соблюдаются, то есть  $i$ -й источник представляет опасность загрязнения в  $j$ -й точке, рассчитывается соответствующая составляющая концентрации вредности по уравнению (1), которое с учетом криволинейности осевой линии факела принимает вид

$$C_i = \frac{3G_i}{S_{ij}^2 \Psi_{\text{гр}i}^2 u_i} \exp \frac{-6,3}{\Psi_{\text{гр}i}} \left( \frac{R_{ij}}{S_{ij}} \right)^{1,3}, \quad (5)$$

где  $S_{ij}$  – длина отрезка осевой линии  $i$ -го факела вредности (линии тока) от источника до  $j$ -го действующего сечения (длина пройденных отрезков пути). Величину  $S_{ij}$  определяем посредством интерполяции заданной таблично зависимости пройденных отрезков для  $k$ -х точек  $i$ -го факела от их абсцисс  $S_{\phi i}$  ( $x_{\phi i}$ ) для значения  $x_{\phi i} = x_j$ .

Каждый  $k$ -й элемент этой зависимости вычисляется по формуле

$$S_k = S_{k-1} + \sqrt{\Delta x^2 + (Z_k - Z_{k-1})^2}, \quad (6)$$

где первый член означает отрезок пути, пройденный факелом до  $(k-1)$ -й точки (для  $k = 1$ ,  $S_{k-1} = 0$ ), а второй член – приращение пути от  $(k-1)$  до  $k$ -й точки, графически представляющий гипотенузу прямоугольного треугольника DEF на рис. 2.

ж) Определяется общая концентрация вредностей в  $j$ -й точке от точечных источников как сумма составляющих концентраций от каждого источника и фоновой концентрации  $C'_j$ , в  $j$ -й точке.

$$C_j = C'_j + \sum_{i=1}^n C_{ij} \quad (7)$$

4. С применением GPS навигации определяется текущий расход топлива, скорость и направление движения автосамосвалов в данный момент времени и рассчитывается интенсивность газовыделения в каждой заданной точке на автодороге;

5. Выполняется расчет фактических значений концентрации вредностей в любой точке факела по выражению (5), которые являются исходными данными для формирования общей базы данных и построения электронной карты загрязнения атмосферы вдоль трассы автодорог и в прилегающей территории выбросами автотранспортных средств.

Разработанная методика дает возможность построения аналитической модели загрязнения атмосферы вдоль трассы автодороги, позволяет определить границы и объемы зон с концентрацией вредностей превышающей предельно допустимую, графически отобразить распространение факела вредностей при движении карьерных автосамосвалов по дороге в любой момент времени с учетом розы ветров и метеорологической обстановки.

#### **Выводы.**

Предложенная методика позволяет в реальном масштабе времени оценить и выделить опасные по фактору загрязнения атмосферы участки дороги в карьере и на прилегающей к нему территории при различных аэрологических и метеорологических ситуациях.

Методика расчёта учитывает криволинейность осевой линии в факеле распространения вредности от источника путем ее аппроксимации линией тока воздушного потока, проходящей через источник вредности, что повышает точность расчёта и позволяет учесть сложный урборельеф территории.

Разработанная методика расчёта концентрации выхлопных газов в атмосфере при эксплуатации дизельных карьерных автосамосвалов может быть использована как элемент экологического контроля режимов движения автосамосвалов в карьере и на прилегающей к нему территории и как один из управляющих алгоритмов в автоматизированной системе экологического мониторинга чистоты атмосферы окружающей среды.

#### Список литературы

1. Никитин В.С., Битколов Н.З. Проветривание карьеров.- М.: Недра, 1975.- 253 с.
2. Ушаков К. З., Михайлов В. А. Аэрология карьеров.- 2-е изд. перераб. и доп. / Под ред. В.В. Ржевского.- М.: Недра, 1985.- 272 с.
3. Кременчуцкий Н.Ф. и др. Алгоритмы и программы расчета параметров естественного проветривания карьеров // Инф. листок № 86-038.- Запорожье, ЦНТИ, 1986.- 4с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голіньком В.І.  
Надійшла до редакції 03.11.2014*