

2. Методика расчета извлекаемых запасов метана из подработанного и надработанного углепородного массива / В.В. Лукинов, А.П. Клец, В.Г. Ильюшенко и др. // Геотехническая механика: Межведомственный сборник научных трудов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2002. – Вып. 37. – С. 62-69.
3. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах / Г.Д. Лидин, А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, Н.Г. Матвиенко. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 143 с.
4. Айруни А.Т. Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. – М.: Наука, 1981. – 335 с.
5. Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Яновская М.Ф. Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. – М.: Наука, 1979. – 196 с.
6. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К.: Основа, 1994. – 312 с.

**УДК 622.411.52.001.24**

Л.А. Новиков

## **ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ.**

Розглянуто властивості і структуру турбулентного руху повітряного потоку в гірських виробках. Запропоновано наближену математичну модель руху пилового аерозолю на прикладі руху ізольованої вугільної частки. На основі запропонованої моделі отримана методика розрахунку траєкторії руху вугільної частки у повітряному потоці.

## **ENGINEERING TECHNIQUE OF DUST AEROSOL MOVEMENT CALCULATION IN MINING OBJECTS**

There are considered turbulent movement of an air flow properties and structure in mining objects. There's offered approached mathematical model of dust aerosol movement on an example of the isolated coal particle movement. Based on proposed model was getting the technique of dust piece movement in mining air.

Как известно, турбулентный режим движения воздушного потока в канале характеризуется неупорядоченностью движения слоев потока, наличием в потоке пульсаций скорости, давления и других параметров.

Возмущения среды при турбулентном режиме движения представляют собой вихри различного масштаба и интенсивности, причем интенсивность вихрей прямо пропорциональна величине турбулентных пульсаций скорости движущейся среды. В основном это относится к поперечным пульсациям скорости.

Формы вихрей и направления их движений разнообразны. В основном преобладает перемещение вихревых структур в направлении движения потока. Что же касается формы вихрей, то в основном преобладают спиральные вихревые структуры эллипсообразной формы. Зарождающиеся вихри в своем движении увеличиваются в размерах, соседние вихри меньших размеров сливаются в более крупные. С течением времени вихри теряют свою энергию и распадаются на более мелкие. Далее опять начинается образование вихревых структур.

При выводе уравнений динамики двухфазной среды могут быть использованы феноменологический и статистический подходы [1].

Феноменологический подход не учитывает детальную структуру потока, а статистический подход позволяет определить его структуру и возможные способы определения характеристик потока.

При построении математических моделей турбулентных двухфазных потоков, например газа и взвешенных в нем твердых частиц, возникают проблемы, которые связаны с адекватным описанием моделями реальных физических явлений, а также простотой моделей, что необходимо для решения практических задач. Возможность использования приближенных моделей определяется такими параметрами двухфазной среды, как концентрация частиц и число Стокса. При малых значениях числа Стокса течение двухфазной среды можно приближенно считать течением однофазной газовой среды с определенными эффективными свойствами [2]. При больших значениях числа Стокса рассматривают течение однофазной газовой среды, в которой частицы играют роль источников аэродинамического сопротивления. Если концентрация частиц очень мала, то приближенно считают, что в газовом потоке находится единичная частица. При этом рассматривают уравнения движения газового потока. Определяя его параметры, находят траекторию движения частиц и изменение их состояния в каждой точке траектории.

Согласно многочисленным работам, посвященным закономерностям протекания различных физических процессов в турбулентных течениях газозвеси, движение частицы в потоке зависит от различных факторов. Частица в газовом потоке движется неравномерно, значение ее скорости и направление движения постоянно меняется. Это объясняется наличием поперечных и продольных пульсационных составляющих газового потока, взаимодействием частицы с другими частицами, столкновением ее с ограничивающими поток стенками. Движение частицы существенно зависит от ее формы. Так, частицы дисковой и пластинчатой формы двигаются соответственно по зигзагообразной и спиралевидной траектории (при числе Рейнольдса  $Re=10^2-10^5$ ) [3]. При взаимодействии частицы со стенкой она отскакивает от нее под определенным углом, при этом приобретая угловую скорость, которая в зависимости от диаметра частицы может достигать  $10^7 \text{ с}^{-1}$  [4].

На участке поверхности частицы, где совпадают направления обтекания и вращения, возникает область пониженного давления. Это приводит к возникновению поперечной силы Магнуса. Под действием этой силы частица будет двигаться в область пониженного давления.

Наличие неравномерности профиля поперечных пульсаций скорости газового потока приводит к смещению частицы в сторону уменьшения интенсивности пульсаций. Смещение частицы происходит под действием силы турбофореза. Что же касается траектории частицы в пограничном слое, возникающем у какой-либо поверхности, то она в основном определяется силой Сафмена.

Таким образом, из сказанного выше следует, что задача определения параметров траектории частицы довольно сложна и вынуждает прибегать к идеализации рассматриваемого процесса, причем это все равно не избавляет в достаточной степени от сложностей.

Рассмотрим процесс движения вентиляционного потока по выработке. Поток в этом случае имеет твердые границы (движение воздуха происходит в канале). В горных выработках в основном имеют место большие значения чисел  $Re \geq 1000 - 1500$ , которые характеризуют турбулентный режим движения воздуха. При значениях числа  $Re > 50000$  наступает явление автомодельности коэффициента аэродинамического сопротивления  $\alpha$  относительно числа  $Re$  ( $\alpha = \text{const}$ ). Это характерно для выработок с активной вентиляционной струей.

Турбулентные вихри в основном зарождаются у выступов шероховатости поверхности выработки. Причем интенсивность вихрей, их форма и размеры зависят от геометрии и размеров выступов. Кроме того, вихри заносятся турбулентным ядром потока. Пульсационные скорости потока принимают нулевые значения на стенках выработки, а максимальные на расстоянии  $1/5$  радиуса выработки, считая от стенки. Турбулентные пульсации скорости и интенсивность турбулентности прямо пропорциональны размерам шероховатости поверхности.

В любом поперечном сечении выработки интенсивность турбулентности и пульсационные скорости воздушного потока имеют различные значения и распределены несимметрично относительно продольной оси. Это связано с неравномерностью профиля поверхности выработки, наличием местных сопротивлений и т.д.

Воздушный поток, движущийся по выработке, содержит большое количество пыли и представляет собой дисперсионную систему с газообразной средой и твердой дисперсной фазой (пылью). Эта дисперсионная система называется пылевым аэрозолем.

При взаимодействии частиц пыли с вихрем они либо пересекают его, либо двигаются вместе с ним. Причем вихрь может накапливать частицы. При этом происходит снижение его интенсивности.

Выберем плоскую модель горизонтальной незакрепленной выработки круглого поперечного сечения. Рассмотрим поведение отдельно взятой макроскопической угольной частицы ( $D > 10$  мкм) в плоскости  $xOy$ . Будем считать, что выработка прямолинейна и не имеет поворотов, площадь ее сечения постоянна по всей длине. Кроме того, поверхность выработки имеет однородную шероховатость, интенсивность турбулентности для поперечных пульсаций скорости потока и поперечные пульсации скорости распределены симметрично относительно продольной оси выработки. Турбулентный режим движения будем считать установившимся с характерным для него числом  $Re$ , при котором наступает явление автомодельности.

Рассмотрим процесс сдувания пыли. Пусть угольная частица шарообразной формы с диаметром  $d = 15 \cdot 10^{-6}$  м находится на почве выработки. Диаметр выработки  $D = 2,8$  м. Примем значение скорости воздушного потока в поперечном сечении выработки  $u_{max} = 0,35$  м/с, при котором наступает явление автомодельности.

Для перехода частицы во взвешенное состояние необходимо, чтобы выполнялось условие

$$F_n + F_{\text{лоб}} > F_g + F_{\text{адг}},$$

где  $F_n$  – подъемная сила потока воздуха, Н;  $F_{\text{лоб}}$  – сила лобового давления, Н;  $F_g$  – сила гравитации, Н;  $F_{\text{адг}}$  – сила адгезии, Н. В случае, когда  $F_n + F_{\text{лоб}} = F_g + F_{\text{адг}}$  – начинается отрыв частицы. Это происходит при некоторой скорости воздушного потока, называемой критической. Как правило, значение критической скорости определяется экспериментально [5].

Согласно работе [6] значение критической скорости

$$u_k \leq \frac{10.1}{\pi \cdot r_0^2},$$

где  $r_0$  – радиус выработки, м.

Для  $r_0 = 1,4$  м, получим  $u_k \leq 1,64$  м/с.

Максимальный размер частиц пыли, находящихся во взвешенном состоянии, определяется по формуле

$$d_{\text{max}} = 7.16 \cdot \sqrt{\frac{u_{\text{cp}} \cdot v_g \cdot \rho_v}{a \cdot g \cdot \rho_{\text{ч}}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{r_1}}},$$

где  $u_{\text{cp}} \approx u_{\text{max}} / 1.29$  – средняя скорость движения воздуха в выработке, м/с;  $\rho_v$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность материала частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, кгс · с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;  $v_g$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $a$  – экспериментальная константа ( $a = 1 - 2$ );  $r_1$  – величина, пропорциональная коэффициенту корреляции ( $r_1 = 0.2 - 0.5$  кгс · с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>).

Подставляя значения  $u_{\text{cp}} = 0.2713$  м/с;  $\rho_v = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ч}} = 1.35 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $v_g = 1.5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>;  $\alpha = 0.0006$  кгс · с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;  $a = 1.5$ ;  $r_1 = 0.35$  кгс · с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>, получим  $d_{\text{max}} \approx 23 \cdot 10^{-6}$  м.

Решение уравнения движения макроскопической угольной частицы радиусом  $r = 7.5 \cdot 10^{-6}$  м в проекциях на оси координат имеет вид

$$\left. \begin{aligned} v_x &= u_{\parallel x}; \\ v_y &= u_{\perp y} - v_s, \end{aligned} \right\}$$

где  $v_x$  и  $v_y$  – проекции скорости движения частицы соответственно на оси  $Ox$  и  $Oy$ , м/с;  $u_{\parallel x}$  и  $u_{\perp y}$  – проекции скорости движения воздушного потока соответственно на оси  $Ox$  и  $Oy$ , м/с;  $v_s$  – скорость оседания угольной частицы в спокойном воздухе, м/с.

Согласно закону Стокса

$$v_s = \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \nu_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}}},$$

для частицы  $d=15 \cdot 10^{-6}$  м, получим  $v_s=0.009$  м/с.

Распределение скоростей движения воздуха в поперечном сечении цилиндрической выработки выражается формулой

$$u_{//x} = u_{\text{ср}} \left[ 1 - 1,35 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_1}} + 2,02 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_1}} \cdot \left( 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \right] \quad (1)$$

где  $r$  – текущее значение радиуса (м);  $\alpha_1$  – постоянная ( $\alpha_1 = 0.0032-0.0038$ ).

Согласно теории перемешивания Прандтля, объем газа, возникший в слое воздуха, имеющего координату  $y$  и обладающий продольной скоростью  $\bar{u}_{//x}(y)$ , перемещается на расстояние  $l$  в направлении оси  $Oy$ . При попадании выделенного объема в слой с координатой  $(y+l)$  и скоростью  $\bar{u}_{//x}(y+l)$ , происходит изменение скорости в слое на величину  $u'_{//x}$ , определяемую выражением

$$u'_{//x} = \bar{u}_{//x}(y) - \bar{u}_{//x}(y+l) \quad (2)$$

где  $u'_{//x}$  – продольная пульсационная скорость воздушного потока, м/с;

$l$  – путь перемешивания (м);  $\bar{u}_{//x}(y)$  и  $\bar{u}_{//x}(y+l)$  – осредненные значения скоростей в данной точке пространства (м/с).

Скорость  $u'_{//x}$  порождает поперечную пульсационную скорость  $u'_{\perp y}$ , причем  $|u'_{\perp y}| \approx |u'_{//x}|$ . Так как значения поперечных пульсационных скоростей воздушного потока, характеризующих размеры и интенсивность вихревых структур,

достигают максимума на расстоянии  $r = \frac{1}{5} r_0$ , считая от стенки выработки (или  $r = \frac{4}{5} r_0$ , считая от оси выработки), то определим путь перемешивания  $l_y$  (м) для значения  $y = \frac{1}{5} r_0$ , считая от почвы выработки.

Принимаем  $H=D=2.8$  м, где  $H$  – ширина выработки (м). Согласно графику изменения пути перемешивания  $l_y$  в горизонтальной плоскости модели выработки, проходящей через центр сечения [7], получим  $l_{0,28} = 0.0924$  м.

Рассмотрим движение угольной частицы, попавшей в вихрь, имеющий форму эллипса. Проведем на расстоянии  $y = \frac{1}{5} r_0$ , считая от почвы выработки, прямую  $h$  параллельную оси  $Ox$  и построим отрезок  $cf$ , перпендикулярный данной прямой и разбиваемый ею пополам. Построим также эллипс с полуосями  $a$  и  $b$ , где  $a = cf / 2$ ,  $b = a / 1.5$  (рис. 1, а). Так как вихрь сохраняет свою индивидуальность на пути перемешивания  $l_{0,28}$ , то будем считать, что большая ось эллипса  $2a = cf = l_{0,28}$ . Отсюда находим:  $a = 0.0462$  м,  $b = 0.0308$  м.

Точки  $c$  и  $f$  расположены от оси выработки на расстоянии  $r = r_c = 1.1662$  м и  $r = r_f = 1.0738$  м соответственно. По формуле (1) определим значение  $u_{//x}$  в точках  $c$  и  $f$ . Принимая  $\alpha_1 = 0.0032$ , получим  $u_{//x}(r_c) = 0.244$  м/с и  $u_{//x}(r_f) = 0.265$  м/с соответственно для точек  $c$  и  $f$ .

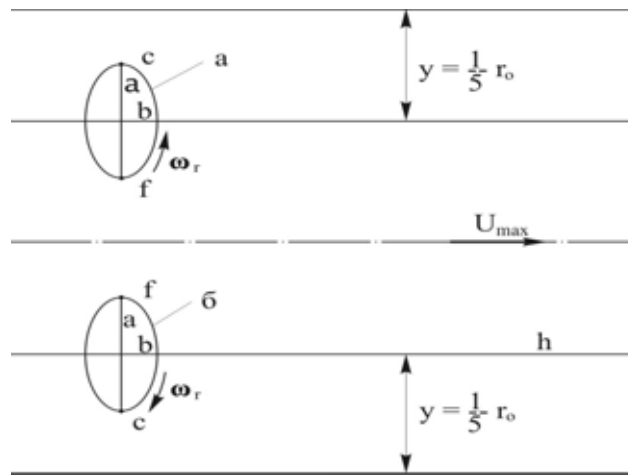


Рис. 1- Эллипсообразный вихрь, центр которого лежит на прямой  $h$ : а – прямая  $h$  расположена на расстоянии  $y = 1/5 r_0$ , считая от почвы выработки; б – прямая  $h$  расположена на расстоянии  $y = 1/5 r_0$ , считая от кровли выработки.

Центром вихря будет точка пересечения отрезка  $cf$  с прямой  $h$  (точка пересечения осей эллипса). Будем рассматривать движение частицы на внешнем контуре вихря, причем центр вихря будет двигаться вдоль прямой  $h$ . Вихрь будем считать изолированным от влияния соседних вихревых структур в течение всего времени его существования.

Согласно работе [8], скорость движения  $U_d$  центра вихря вдоль прямой  $h$  и скорость его расширения  $U_p$  в поперечнике (малая ось эллипса  $2 \cdot b$ ) можно определить по формулам

$$U_d = u_1 - \frac{u_1 - u_2}{2};$$

$$U_p = 0.5 \cdot \frac{1 - u_2}{u_1} \cdot u_1,$$

где  $u_1$  – скорость турбулентной струи на расстоянии  $r$  от оси, м/с;  $u_2$  – скорость спутного потока, м/с.

Принимая  $u_2 = u_{//x}(r_c)$  и  $u_1 = u_{//x}(r_f)$ , получим  $U_d = 0.2545$  м/с,  $U_p = 0.0052$  м/с.

Определим значение  $u'_{//x}$  по формуле (2). Подставляя значение  $y = r_0 - \frac{l_{0.28}}{2}$ , получим  $u'_{//x} = \bar{u}_{//x}(r_0 - \frac{l_{0.28}}{2}) - \bar{u}_{//x}(r_0 + \frac{l_{0.28}}{2}) = u_{//x}(r_f) - u_{//x}(r_c) = 0.021$  м/с.

Время жизни вихря можно определить по формуле

$$T = \frac{l_{0.28}}{|u'_{\perp y}|} \approx \frac{l_{0.28}}{|u'_{//x}|},$$

Подставляя значения  $l_{0.28}$  и  $|u'_{//x}|$ , получим  $T = 4.4$  с.

Пульсационная скорость  $u'_{//x}$  создает угловую скорость вращения вихря с частицей. С учетом того, что с течением времени  $t$  (принимаяем  $t=0-4.4$ с) вихрь будет расширяться в поперечнике со скоростью  $U_p$ , угловую скорость вращения угольной частицы  $\omega_q$ ,  $c^{-1}$  можно определить по формуле

$$\omega_q = \frac{u'_{//x} - v_s}{r_{cp}},$$

где  $r_{cp} = 0.5 \cdot \left( \frac{(b + 0.5 \cdot U_p \cdot t)^2}{a} + \frac{a^2}{(b + 0.5 \cdot U_p \cdot t)} \right)$  – средний радиус кривизны

эллипса, м.

Для начального момента времени  $t=0$ , получим  $r_{cp} = 0.045$  м,  $\omega_q \approx 0.267$   $c^{-1}$ .

Так как  $u_{//x}(r_f) > u_{//x}(r_c)$ , то вихрь будет вращаться по часовой стрелке. Для вихря находящегося симметрично относительно центра выработки (рис.1, б), вращение будет происходить против часовой стрелки.

За время  $T$  вихрь пройдет путь  $l_\delta = U_\delta \cdot T \approx 1.12$  м и расширится в поперечнике до размеров  $b_{max} = b + 0.5 \cdot U_p \cdot T \approx 0.04224$  м.

После прохождения вихрем пути  $l_\delta$  он начнет быстро терять энергию и распадаться на более мелкие вихри. Так как довольно сложно определить, в какой из образовавшихся вихрей попадет частица, какова его интенсивность, поведение и время существования, будем считать, что частица выпадает из вихря в конце пути  $l_\delta$ . Для упрощения описания дальнейшего поведения частицы будем считать, что частица в конце пути  $l_\delta$  сразу попадает на внешний контур нового изолированного вихря, центр которого также будет двигаться вдоль прямой  $h$ . Причем начальные размеры и форма нового вихря в момент попадания в него частицы будут определяться размерами и формой рассмотренного выше эллипса с полуосями  $a$  и  $b$ . Движение вихря и его поведение будет в точности таким же, как и у ранее рассмотренного вихря.

Координаты частицы в плоскости  $xOy$  при движении центра вихря вдоль прямой  $h$  на пути  $l_\delta$  определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} x &= (b + 0.5 \cdot U_p \cdot t) \cdot \cos(\omega_q \cdot t) + U_\delta \cdot t ; \\ y &= k \cdot r_0 + a \cdot \sin(\omega_q \cdot t), \end{aligned} \right\}$$

где  $k \cdot r_0$  – расстояние прямой  $h$  от почвы, м;  $k$  – коэффициент (принимаяем  $k = 1/5$  и  $k = 9/5$ ).

Для частицы, находящейся в симметрично расположенном вихре (рис.1,б), координаты в плоскости  $xOy$  определяются аналогично.

Траектория движения частицы в плоскости  $xOy$  на пути  $l_d$  относительно прямой  $h$ , расположенной на расстоянии  $y=1/5 r_0$  и  $y=9/5 r_0$ , считая от почвы, показана на рис.2 и рис.3 соответственно.

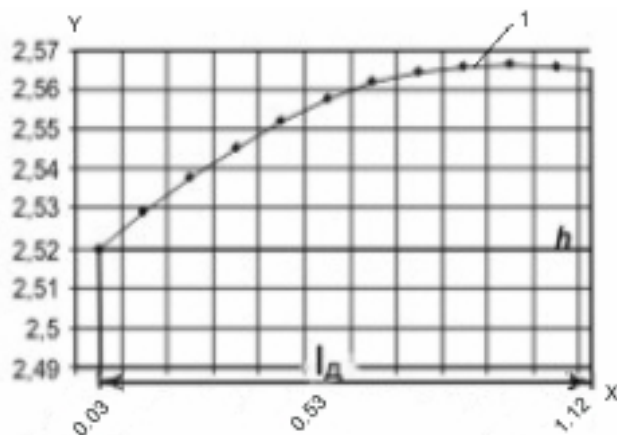


Рис. 2 - Траектория движения частицы в плоскости  $xOy$  на пути  $l_d$  относительно прямой  $h$ , расположенной на расстоянии  $y=1/5 r_0$ , считая от почвы: 1 – траектория движения частицы.

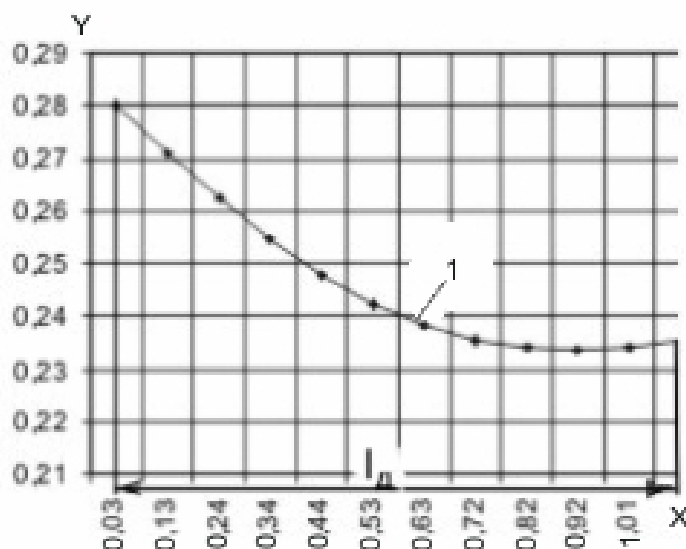


Рис. 3 - Траектория движения частицы в плоскости  $xOy$  на пути  $l_d$  относительно прямой  $h$ , расположенной на расстоянии  $y=9/5 r_0$ , считая от почвы: 1 – траектория движения частицы.

Виды траекторий движения частицы в сечении выработки на участке длиной  $L > l_d$ , имеющем некоторые неровности кровли, показаны на рис.4.

Максимальное расстояние, которое может пройти частица пыли диаметром  $d$  с момента попадания ее в воздушный поток можно определить по формуле



$$L_{max} = \frac{18 \cdot D \cdot \eta_v \cdot u_{cp}}{\rho_{\text{ч}} \cdot d^2},$$

где  $\eta_v$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Для  $\eta_v = 1.8 \cdot 10^{-5}$  Па·с, получим  $L_{max} = 810$  м.

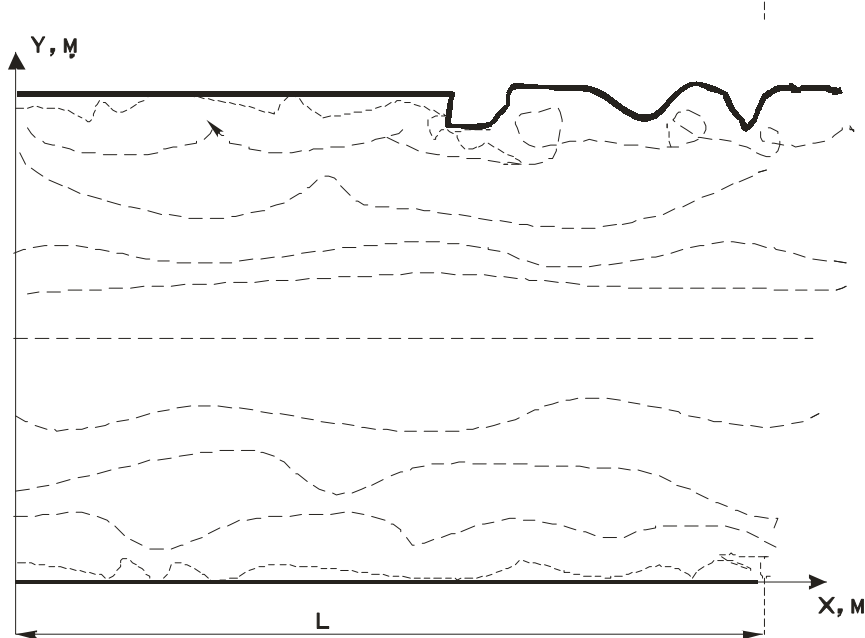


Рис.4- Виды траекторий движения частицы в сечении выработки на участке длиной  $L > l_{\partial}$ , имеющей неровности поверхности кровли

Приведенная методика расчета траектории движения изолированной угольной частицы в воздушном потоке позволяет прогнозировать ее поведение в выработке с учетом турбулентности воздушного потока. Кроме того, предложенная приближенная математическая модель движения изолированной угольной частицы в воздушном турбулентном потоке выработки, может быть использована в качестве основы для построения более сложных моделей движения турбулентных течений газозвеси, поскольку в большинстве случаев для описания эволюции состояния двухфазной среды достаточно приближения единичной частицы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрайберг А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом.- Киев : Наук. думка, 1980.- 250 с.
2. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.- М.: Машиностроение, 1974.- 212с
3. Christiansen E.B., Barker D.H. The effect of shape and density on the free settling of particles at high Reynolds numbers // AIChE Journal.- 1965.- 11, N 1.- P. 145-151.
4. Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках.- Киев: Наук. думка, 1972.- 176 с.
5. Кирич Б.Ф., Диколенко Е.Я., Ушаков К.З. Аэрология подземных сооружений (при строительстве).- Липецк: Липецкое издательство, 2000.- с. 140.
6. Бурчаков А.С., Москаленко Э.М. Динамика аэрозолей в горных выработках. М., "Наука", 1965. 68 с.
7. Справочник по рудничной вентиляции. Под ред. К.З. Ушакова. М., "Недра", 1977.- с. 55.
8. Турбулентные течения.– М.: Наука, 1977.– с. 129-139.