

СТРУКТУРНО-ФРАКТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В МЕХАНИКЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛИ

Гого В.Б. канд. техн. наук, Малеев В.Б. докт. техн. наук,
Донецкий национальный технический университет

Теоретически описан процесс очистки газа от пыли на основе математической модели фрактальной структуры дисперсного газожидкостного потока при поглощении частиц пыли каплями жидкости.

In a theory the process of cleaning of gas is described from a dust on the basis of mathematical model of fraktal structure of dispersion gaz-liquid stream at absorbtion of particles of dust by the drops of liquid.

Борьба с пылью является актуальной проблемой для многих отраслей промышленности, особенно для угольной, т.к. является причиной профессиональных заболеваний шахтеров. Известные средства не позволяют эффективно защищать от пыли органы дыхания, поэтому необходимы исследования, направленные на поиск новых решений. Известные научные работы в области борьбы с пылью на основе жидкостной среды (авторы: Губарь В.Ф., Солодовников А.М., Медведев Э.Н. и др.) в основном рассматривали отдельные стороны этого сложного гидродинамического процесса, как правило, на основе экспериментальных исследований. Теоретическая сторона вопроса, а следовательно и возможность оптимизации гидродинамического процесса защиты от пыли остается открытой, т.к. нет модели и математического описания структуры трехфазного потока «газ-жидкость-твердое», что является основой для энергетической оптимизации процесса и повышения эффективности защиты от пыли. Таким образом, решение задачи о структуре газожидкостного потока, в котором капли жидкости поглощают частицы пыли, является актуальным в плане научных исследований по охране труда.

Обоснуем положение о том, что диспергированный газожидкостный поток с твердыми частицами пыли в процессе газоочистки, т.е. поглощения каплями жидкости (воды) твердых частиц можно рассматривать в модели как фрактальную систему подобных структур и элементов в виде сферических тел известной массы. Фрактал – это

структурная организация самоподобных элементов. Например, шестеренки многоступенчатого редуктора.

В начале отметим, что до сих пор при описании процессов гидродинамической мокрой газоочистки отсутствует картина закономерностей формирования структуры течения капель жидкости в потоке газа, наполненного частицами пыли. Очевидно, что динамическая турбулентная структура многофазного потока во времени должна строиться не путем сложения его составных частей, а каким-то нетривиальным образом – интерпретироваться физической моделью стохастического процесса.

Стохастичность координатных положений компонент потока в материально-точечных моделях-сферах проявляется в детерминированной структуре потока по его сечению и длине (высоте). В связи с этим воспользуемся построениями фрактальной геометрии [1,2].

Прежде всего, диспергированный поток «газ-жидкость-твердое тело» является самоподобной структурой, составленной из сферических тел – компонентов разных диаметров. Однако для фрактального геометрического построения можно взять только капельные структуры жидкости и модельно-сферические структуры твердых частиц пыли одинаковой массы. Такое решение обосновано следующим: диаметры жидких капель и диаметры твердых частиц примерно одного порядка (например 1 мкм). Диаметры газовых молекул (например, оксидов серы) примерно 0,01 мкм. Для гидродинамической очистки газов с ударным столкновением компонентов нас интересует импульсное (кинетико-энергетическое) воздействие капли на твердую частицу. Газовые компоненты адсорбируются жидкими каплями, которые (предполагаем) уже захватили или захватят твердые частицы. Безусловно, что при соответствующих скоростях потока капли (частицы) могут сливаться, дробиться, отбрасываться на стенки канала, т.е. выходить из потока или входить, дробясь на новые капли. Механизм этих ударных взаимодействий представим геометрической моделью, показанной на рис. 1.

Геометрические фракталы бинарной системы «жидкость-твердое» получены с помощью линии (поверхности для пространства), охватывающей элементы фрактала (на рис.1 – пунктирные линии).

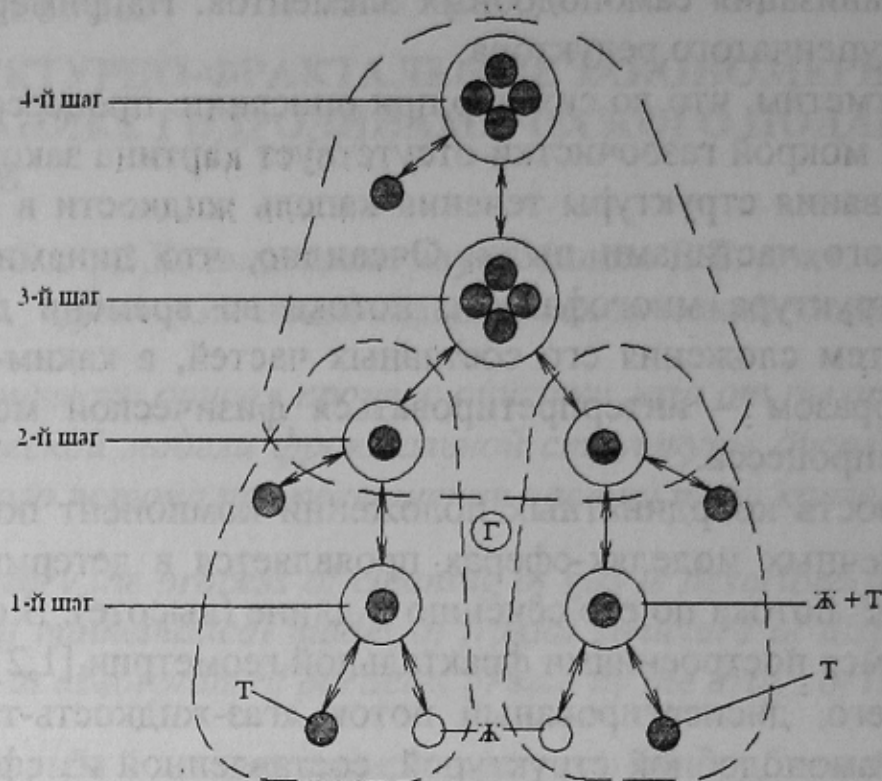


Рисунок 1 - Модель самоподобной структуры фракталов дисперсного потока «газ (Г) – жидкость (Ж) – твердая частица пыли (Т)» в процессах их взаимодействия (слияния-дробления).

Таким образом, стохастичность и турбулентность потока сложной структуры, может быть представлена простым геометрическим алгоритмом, математическое описание которого возможно с удобными для расчетов приближениями.

Исследуем закономерности фрактальной структуры дисперсного трехфазного потока по времени (что тождественно по высоте потока), воспроизводя в динамике повторяющиеся ярусами самоподобные блоки, возрастающих по размерам капель с поглощенными частицами пыли. Математическая сторона процедуры состоит в следующем.

Геометрическое построение начинается с того, что для диспергированного множества капель жидкости в потоке твердых частиц, имеющих известную единичную массу (единичный диаметр) на первом шаге попарно объединяем (соударяем) с твердыми частицами пыли до образования объектов двойного размера (массы):

$$m_1 = m_0 + \bar{m}_0, \quad (1)$$

где m_1 - масса капли первого слияния;

m_0 - исходная единичная масса капли;

\bar{m}_0 - исходная единичная масса частицы.

На втором шаге к каждой капле двойного размера (массы) добавим по единичному объекту (твердой частице);

$$\begin{aligned} m_2 &= m_1 + \bar{m}_0; \\ m_2 &= m_0 + 2\bar{m}_0. \end{aligned} \quad (2)$$

На третьем шаге объединим попарно образовавшиеся после второго шага капли с внедренными частицами пыли:

$$m_3 = 2(m_0 + 2\bar{m}_0) = 2m_0 + 4\bar{m}_0. \quad (3)$$

На четвертом шаге к образовавшейся капле (m_3) после третьего шага добавим единичную твердую частицу. С физической стороны такой процесс поглощения каплей частиц пыли будет продолжаться до достижения каплей предельной массы (размеров). С математической стороны исследования продолжим соударять капли и твердые частицы на нечетных шагах и сливать капли на четных шагах. В результате получим фрактальное множество, имеющее геометрическую закономерность: на плоскости в форме – «треугольник», а в пространстве – «пирамида».

Проанализируем полученный фрактал диспергированной структуры потока. Возьмем отношение числовых характеристик ближних четных (или нечетных) шагов:

$$\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m_n}{m_{n-2}} = 2,000. \quad (4)$$

Затем получим отношение числовых характеристик четных шагов к характеристикам нечетных шагов, т.е.

$$\beta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{2n}}{a_{2n-1}} = 1,000. \quad (5)$$

Таким образом, принятый фрактал является бинарным с двумя константами соотношений параметров $\alpha=2,000$ и $\beta=1,000$. Эти два параметра α и β формируют бинарный фрактал множества как основу структурного анализа происходящих энергетических взаимодействий между каплями жидкости и твердыми частицами пыли в заданном диспергированном трехфазном потоке «газ-жидкость-твердое». Модель такого фрактального потока и показана на рис.1. На определенном шаге геометрического построения бинарных фракталов «жидкость-твердая частица (пыль)» получим предельную жидкую каплю, составленную из первичных единичных капель и частиц твердого. Будем считать, что время формирования этой

предельной капли и есть технологическое время процесса гидродинамической очистки газа от пыли.

Анализирую модельную структуру фрактального потока, отмечает ее очевидную самоподобность. Понятно, что для реального графического построения потока на основе фракталов необходимы тысячи графических элементов. Следует так же отметить, что фрактальная конструкция потока дает возможность представить «стоп-кадр» динамики процесса очистки газов от пыли. В основе его лежит состояние однотипного структурного образования – фрактала «единичная капля жидкости – единичная твердая частица пыли», а в динамике процесса фрактала – «слияние-захват».

Такое четкое представление «элементарной ячейки (объема потока)» позволяет характеризовать весь фиксированный объем по содержанию и действиям.

Как следует из рис.1, конечная стадия структуры каждого текущего шага (мгновения) является начальной стадией структуры каждого последующего мгновения, в состоянии «фрактального потока» «газ-жидкость-твердое». Общая структура представляет собой интегральный узор фракталов – субструктур, в котором элементы низшего порядка являются одновременно началом более высокого порядка. Самоподобные структуры «капля – твердая частица» повторяются в другом масштабе фрактала, как бы накладываясь и переплетаясь, однородно заполняя рабочий объем потока. Задавшись параметрами единичной капли и частицы пыли, а также параметрами конечной капли, можно определить число шагов, своего рода звеньев (фракталов) в полной цепи потока (заданного рабочего объема потока).

Следует отметить, что для указанной модели дисперсного потока «газ-жидкость-твердая частица» невозможно изъять из общей структуры какое-либо звено субструктуры, не нарушив единства потока. По фиксированной массе конечной капли, выбывающей из потока, можно вычислить количество самоподобных структур, повторяющихся в масштабе элементарного объема потока, а в конечном расчете и число соударений «жидкая капля – твердая частица». Безусловно, что указанный фрактал, является открытой структурой, взаимодействующий с окружающей средой (стенками аппарата, газом и т.д.), однако детерминировано отражающей весь процесс в потоке. Факториальная динамика структуры потока может быть представлена «фрактальной пирамидой элементов» единичных параметров. Запишем «шифр» этой пирамиды потока в таком виде: $i=1 \dots n$

$$\left. \begin{array}{l} n_1=1; \quad m_1=1+1; \\ n_2=2; \quad m_2=(2+1); \\ n_3=3; \quad m_3=(2+1)+(2+1)=2(2+1); \\ n_3=4; \quad m_4=2(2+1)+1; \\ n_5=5; \quad m_5=2(2+1)+1+2(2+1)+1=2[2(2+1)+1]; \\ n_6=6; \quad m_6=2[2(2+1)+1]+1; \text{ и т.д., до } i=n, \end{array} \right\} \text{ фрактал} \quad (6)$$

где i – номер шага (яруса) пирамиды (потока).

В представленной записи отражена установленная закономерность структуры дисперсного трехфазного потока «газ-жидкость-твердая частица» с очевидным упрощением «жидкость-твердая частица». Базовыми являются две цифры «единица» и «двойка». Они образуют фрактальную информационно-структурную пирамиду (числовой массив) всего потока. Причем, сама «двойка», т.е. слившиеся «капля-твердая частица», является результатом сложения двух «единиц». Таким образом, фрактальная динамика структуры дисперсного потока или процесса взаимодействия «капля жидкости – твердая частица» и т.д. имеет константы бинарного фрактала [1], т.е. α и β . Эти два показателя образуют закономерную тапологию потока с пространственно переплетенным узором самоподобных субструктур «капель-частиц». Исследуя запись фрактальной пирамиды, устанавливаем, что в ее основе лежит математическая конструкция элемента $(2+1)$. Очевидно, что все фрактальные формулы составлены по единому алгоритму (см. рис.1). Это позволяет аргументировано принять модель структуры дисперсного потока в виде изложенного выше фрактального графо-аналитического построения.

Прежде всего, на всех уровнях формирования структуры «капля-твердая частица (пыль)» прослеживается единый алгоритм описания всего фрактального множества, т.е. трехфазного потока «газ-жидкость-твердое»:

- 1) фрактал «капля-частица» отражает бинарность формирования динамики структуры потока;
- 2) фрактальная пирамида формируется шагами (ярусами) соответствующими достижению предельной капли, выбывающей из взаимодействия или снова подвергающейся дроблению;
- 3) самоподобная структура, копирующая элементарный объем потока (фрактал), повторяется на очередном шаге (ярусе, ступени) фрактальной структуры дисперсного потока, образуя расчетное число уровней внутренней структуры потока;

- 4) фрактал дисперсного потоку «капля-пиль» являється разомкнутою структурою, відповідно, він може враховувати вплив зовнішньої (оточуючої) середовища;
- 5) сутність бінарності фрактальної структури потоку складає в тому, що кожна течеюча підструктура утворена двома підструктурами нижчого порядку. Математично це стає закономірним, що відображають формули, в яких присутствує і повторюється подвійка;
- 6) фрактальна структура всього потоку являється «сходяться» в відношенні кінцевого (по часу або довжині потоку) результату.

Таким чином, фрактал потоку відображає не стільки його фіксовану структуру, а стільки динаміку процесу формування всієї структури потоку в межах фіксованих геометричних (часових) і гідродинамічних характеристик потоку.

Установлена можливість фрактального опису дисперсного трьохфазного потоку стає принципово важливою, т.к. обґрунтовується математично. Фізичні обмеження по розмірам рідинних крапель (початкових) і наповнених твердими частинками пилі (кінцевих) «природно-технічні», тому можна задати межі як для ділимості так і для зростання краплі. Виходячи з математичного опису «фрактальної піраміди потоку», оцінимо масу граничної краплі наступним структурним математичним співвідношенням:

$$M = m_0 \left(\sum_i^N 2^i k_s^{(N+2)-1} + (2^N - 1)(k_s^2 + 1) + 1 \right), \quad (7)$$

де M – маса граничної краплі; k – масовий коефіцієнт для i -го кроку зливання; N – кількість кроків (злив); m_0 – показник кратності маси краплі (частинки пилі).

Згідно (7) маємо, що гранична крапля утворюється шляхом послідовних злив (включень) структурних одиниць. При цьому на кожному кроку загальна маса краплі зростає як за рахунок маси частинки пилі так і за рахунок попередньої рідинної краплі (краплі з частинкою пилі). Чітко видно, що кожна підсистема створюється по одному і тому ж шаблону потоку. Кожен більший об'єм (частина) структури потоку в точності повторює елементарну структуру. При цьому завершальний крок формування граничної структури (краплі) стає початком нового процесу нарощування (або дроблення) краплі з наявністю в ній твердих частинок пилі.

Таким образом, проявляется пространственная (объемная) упорядоченность формирования внутренней структуры всего потока дисперсной трехфазной смеси. Математическое выражение (7) показывает, что существует дискретность образования (формирования) капли, т.е. дискретность ее энергетического состояния совместно с «поглощенными» частицами пыли. Из этого следует, что внутренняя энергия «капля+частица (или частицы)» формирует определенную частоту колебаний ее поверхности, т.е. частотность «слияний» или «распадов».

Последнее дает возможность полагать, что наряду с пространственной упорядоченностью потока в виде фракталов, существует и временная упорядоченность в частотности образования внутренних элементов фрактала – динамичных (во времени) структур «капля-частица(ы)». Это указывает на то, что в динамике структурного формирования имеет место алгоритм рекурсивности, т.е. копирования малого в большом и большого в малом. [2]. При этом сохраняется единый принцип формирования всего потока участвующих частиц жидкости и пыли в динамике их движения, слияния и распада.

Следовательно, принятая и обоснованная фрактальная структура трехфазного потока в модели может быть представлена графически, математически и алгоритмически.

Выводы:

1. Обоснована модель процесса гидропылеподавления для трехфазного потока «газ-жидкость-твердое» дисперсной структуры в виде фракталов «жидкая капля – твердая частица пыли» для математического описания поглощения капель частицы пыли.
2. Найдено математическое выражение структуры фрактала как основы для аналитического поиска массы предельной капли и исследования процесса энергетических изменений в потоке капель и твердых частиц пыли, т.е. гидродинамической очистки газа от пыли.
3. Теоретически установлено, что процесс образования предельной капли является дискретным, что эквивалентно дискретным энергетическим состояниям капли с поглощенными частицами пыли, т.е. внутренняя энергия предельной капли как системы «капля-частицы пыли» формирует определенную частоту колебаний ее поверхности, частоту слияний или распадов.

Список источников:

1. Федер Е. Фракталы.-М.Мир.-1991.-243 с.
2. Анасимов А.В. Информация. Рекурсия.-К., «Наукова думка», 1988.- 218 с.