

ТРЕКОВЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ПОТОКА ЛАМИНАРНОГО ПЛАЗМОТРОНА

И. П. Гуляев*, П. Ю. Гуляев**, А. В. Долматов**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск

**Югорский государственный университет,
г. Ханты-Мансийск

Множество технологических процессов газотермического напыления обладают общим свойством: неразрывностью потока и взаимнооднозначной зависимостью между скоростью и концентрацией частиц конденсированной фазы. Этого достаточно для создания простой системы диагностики. Среди современных методов оптической анемометрии следует выделить: лазерно-доплеровскую анемометрию [1], интегральные и дискретные времяпролетные методы [2], а также быстроразвивающиеся в последнее время стробоскопические «трековые» методы измерения скорости потока частиц с помощью быстродействующих оптических затворов и телевизионных CCD-матриц высокого разрешения [3]. Все они достаточно универсальны и объективны для того, чтобы результаты измерений, полученные независимыми методами, можно было легко перепроверить и сопоставить между собой по точности.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели и компьютерная реализация виртуальной информационно-измерительной системы диагностики процессов массопереноса в двухфазных потоках.

Основной физической моделью, лежащей в основе интегральных времяпролетных методов контроля скорости, является представление движения двухфазного потока в виде движения двух взаимопроникающих континуумов газовой фазы и «псевдогаза» частиц конденсированной фазы [4], для которой справедливо уравнение непрерывности, описывающее движение потока ньютоновской жидкости (псевдогаза частиц), чувствительной к ударным волнам:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

где: $n = N(t)/V$ - концентрация частиц в малом измерительном объеме $V = \Delta l \cdot S$, а величина S - поперечное сечение потока, Δl -

толщина измерительного объема в направлении движения потока, $\vec{v}$ - скорость потока «псевдогаза».

Экспериментальная основа диагностики скоростных характеристик двухфазного потока заключалась в последовательном выделении сверхскоростной ИК-телевизионной системой «Видео-спринт» кадров теплового изображения одинаковых порций частиц потока, описываемых как континуумы, измерении скорости по размеру треков частиц и известному времени экспозиции.

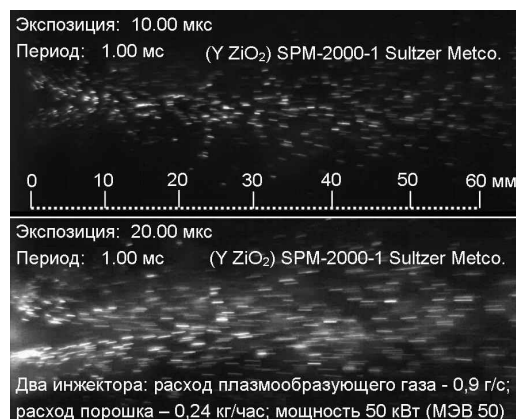


Рисунок 1 – Регистрация потока «псевдогаза» частиц сверхскоростной ТВ-камерой

Введем обозначения:

$q(t, x) = Q(\rho) = (dn/dt) \cdot V$ - интенсивность потока частиц, пересекающих поперечное сечение измерительного объема V , т.е. число частиц в единицу времени;
 $\rho(t) = (\partial n / \partial x) \cdot S = (\partial n / \partial x) \cdot V / \Delta l$ - плотность частиц (приведенная к толщине измерительного объема), т.е. число частиц на единицу длины. Тогда уравнение непрерывности в одномерном виде записывается следующим образом:

$$q(t, x) = \rho \cdot v \quad (2)$$

Скорость потока определяется отношением:

$$v = q/\rho = [Q(\rho)/\rho], \quad (3)$$

т.е. средняя скорость является функцией плотности $v(x, t) = v_e(\rho(x, t))$.

После подстановки в уравнение непрерывности потока получим:

$$\rho_t + c(\rho) \cdot \rho_x = 0, \quad (4)$$

где $c(\rho) = Q'(\rho) = v_e(\rho) + \rho \cdot v_e'(\rho)$ - скорость распространения возмущений в потоке «псевдогаза».

Соотношение $Q(\rho) = \rho \cdot v_e(\rho)$ играет важную роль в теории многофазных потоков и называется *фундаментальной диаграммой* (рис. 1). В модели Лайтхилла-Уизема [5] эта зависимость непрерывна и предельная пропускная способность двухфазного потока определяется плотностью потока «псевдогаза» частиц конденсированной фазы.

Общий вид решения нелинейного уравнения (4):

$$c(x, t) = F(x - vt), \quad (5)$$

где F - произвольная функция. Соотношение (5) описывает бегущую волну, рассматриваемую как *волну уплотнения в среде*.



Рисунок 2 – Фазовые состояния потока на фундаментальной диаграмме

Анализ поведения таких волн, проведенный Дж. Уиземом [6], показал возможность возникновения нескольких динамических режимов движения двухфазного потока, приведенных на рис.2. В фазовом пространстве $\{q, \rho\}$ они образуют последовательные переходы от свободного истечения «слабозапыленного» потока, который, достигая максимальной «нагрузочной» способности, постепенно превращается в стратифицированную систему из самоупорядоченных уплотнений «псевдогаза» частиц, а затем становится прерывистым и наконец наступает ситуация называемая «катастрофой плотности потока» - пробка.

В одномерном случае (рисунок 3.), в качестве оптического регистратора, может применяться линейная многоэлементная матрица из M фотодиодов. Интенсивность потока частиц определяют по интенсивности светового излучения, а плотность потока частиц – по разности интенсивностей входящего и выходящего потока частиц в сечениях, задающих базовое расстояние пролета L .

Количество частиц в i -ом сечении в некоторый момент времени t может быть найдено как произведение погонной плотности $\rho_{\text{пол}}$ на этом участке на ширину сечения Δl :

$$N_i(t) = \rho_i(t) \Delta l$$

Введем понятие средней погонной плотности частиц, как отношение разности числа частиц $N_{\text{вх},j}(t)$, вошедших через j -ое сечение и числа частиц $N_{\text{вых},i}(t)$ вышедших через i -ое, к расстоянию L между ними:

$$\langle \rho(t) \rangle = \frac{N_{\text{вых},i}(t) - N_{\text{вх},j}(t)}{L} = \frac{\langle N_{ij}(t) \rangle}{L}. \quad (6)$$

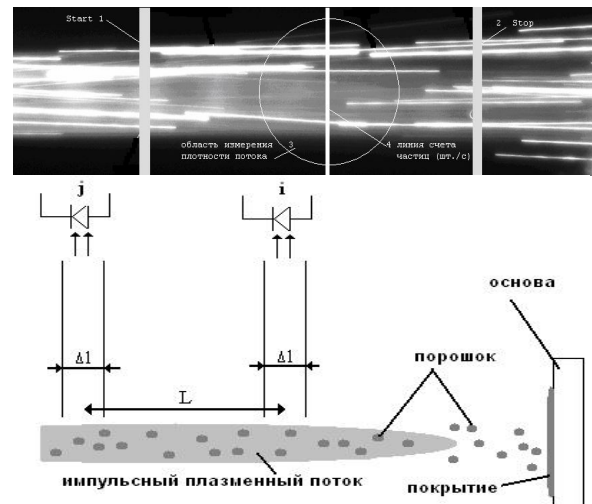


Рисунок 3 – Оптическая схема диагностики двухфазного потока

Запишем уравнение непрерывности для одномерного случая:

$$\frac{d\langle \rho_{\text{пор}}(t) \rangle}{dt} = - \frac{d\langle ?(t) \rangle}{dx} \quad (7)$$

Из (7) изменение средней интенсивности $d\langle ?(t) \rangle$ в сечении L за период квантования сигнала $\Delta t_{\text{кв}}$ будет равно (без учета знака):

$$d\langle ?(t) \rangle = d\langle \rho_{\text{пор}}(t) \rangle \frac{L}{\Delta t_{\text{кв}}}, \quad (8)$$

ТРЕКОВЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ ПОТОКА ЛАМИНАРНОГО ПЛАЗМОТРОНА

а с учетом (6), получим:

$$d\left(\frac{\langle N_{ij}(t) \rangle}{L}\right) \frac{L}{\Delta t_{KB}} = \frac{d(\langle N_{ij}(t) \rangle)}{\Delta t_{KB}} \quad (9)$$

Число частиц, вошедших в j -ое сечение к моменту времени t , есть сумма числа частиц $N_j(t)$, входящих в j -ое сечение за время dt , по рассматриваемому временному отрезку, то же справедливо и для числа частиц $N_i(t)$, вышедших за время t через i -ое сечение.

$$N_{\text{вх},j}(t) = \frac{1}{K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t J_j(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$N_{\text{вых},i}(t) = \frac{1}{K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t J_i(\tau) d\tau,$$

где $J_j(t)$ и $J_i(t)$ - сигналы фототока, снимаемые с j -го и i -го фотодиодов соответственно. На основе (6), (8) и (10) получим:

$$\langle v(t) \rangle = \frac{1}{\Delta t_{KB} K_0 \varepsilon_0(T)} \int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau \quad (11)$$

Перепишем выражение (3) с учетом (6) и (11):

$$v = \frac{1}{\Delta t_{KB} K_0 \varepsilon_0(T)} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{\left(\frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L}\right)}. \quad (12)$$

Допустим, что изменением погонной плотности $\rho_{\text{поз}}$ между i -ым и j -ым сечениями можно пренебречь (меняется незначительно на выбранном интервале), тогда:

$$\langle \rho_{\text{поз}}(t) \rangle = \frac{\langle N_{ji}(t) \rangle}{L} \approx \frac{N_j(t)}{\Delta l} \approx \frac{N_i(t)}{\Delta l}. \quad (13)$$

Окончательно, для скоростей потока в i -ом и j -ом сечениях, выражая $N(t)$ из (10) и проводя некоторые упрощения, получим следующие соотношения:

$$v_i = \frac{\Delta l}{\Delta t_{KB}} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{J_i(t)}; v_j = \frac{\Delta l}{\Delta t_{KB}} \frac{\int_0^t \Delta J_{ji}(\tau) d\tau}{J_j(t)}.$$

Разработанный диагностический комплекс апробирован на ламинарной плазмен-

ной установке нанесения покрытий МЭВ 50. Результаты анализа усредненной скорости частиц в различных частях плазменного потока приведены на рис.4. Усреднение проводилось по ансамблям частиц с минимальной массовой долей ансамбля 0,1%. Используя приведенные гидродинамические модели, удалось выявить закономерности распределения скорости частиц вдоль длины плазменного потока. Было обнаружено существенное изменение структуры потока при переходе в сверхзвуковой режим и появление ярко выраженной ударной волны. Движение ударной волны сопровождается высокоскоростной компактной транспортировкой группы частиц.

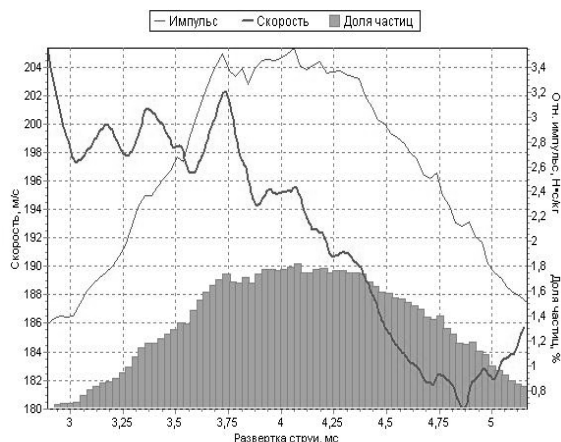


Рисунок 4 – Распределения скорости, массы и импульса в двухфазном потоке

Зависимость интенсивности потока частиц от их концентрации позволили получить обобщенную характеристику транспортного двухфазного потока.

Выводы.

Новый подход к диагностике двухфазных потоков, основанный на измерении ограниченного числа параметров, позволяет интегрально оценить величину скорости потока независимо от температуры и дисперсионного состава.

Такой метод диагностики более полезно использовать не только для исследования двухфазных потоков, но и как индикатор технологического режима работы установки, т.е. для определения предельной пропускной способности и перехода в неустойчивые режимы напыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы лазерной доплеровской анемометрии/ Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С.// - М.: Наука, 1982.- 303 с.

2. Способ определения скорости импульсного аэродисперсного потока/ Евстигнеев В.В., Гуляев П.Ю., Еськов А.В.// Патент РФ № 2147749.- опубли. 20.04.2000 в Бюл.И. № 11.
3. Red-time particle size analysis during inert gas atomization/ Biancaniello F., Presser C., Ridder S. // Mater. Sci. Eng. A.- 1990.- 124.- pp. 21-29.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред.- М.: Наука, 1987.- 464с.
5. Lighthill M.J., Whitham G.B. On kinetic waves I. Flood Movement in Long Rivers // Proc. of the Royal Society Ser. A. 1955. - Vol. 229. - No. 1178. - P. 281-316.
6. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны.- М.: Мир, 1977.-622 с.