

МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОСТНЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ

Иванов В.И., Иванов Н.И.
 НИИ ядерных проблем БГУ
 Минск, Республика Беларусь

Предложен метод многопараметровой диагностики двухфазных потоков различной природы, представляющих собой несущую фазу с дискретными включениями (ДВ): газовых пузырьков и различных частиц в водной несущей фазе, аэрозольных частиц в атмосфере, мелкомасштабного мусора и микрометеороидов в космическом пространстве, различного рода ДВ в аэродинамических потоках и жидкостных струях. Скорость потоков может достигать сотен метров в секунду с минимальными размерами ДВ 3–5 мкм. Метод позволяет одновременно определять скорость и размеры ДВ, а также истинную объемную концентрацию ДВ в несущей фазе потока. Реализация метода возможна на различных зондовых детекторах [1], однако наибольшая чувствительность метода, а также возможность диагностики высокоскоростных и высокотемпературных потоков достигается при использовании оптиковолоконных детекторов (ОВД). Диагностика двухфазных потоков осуществляется в непосредственной близости к приемно – излучающей апертуре A_d ОВД с использованием низкокогерентного излучения лазерных диодов с мощностью 1–5 мВт. При этом одиночный сенсор или матрицу ОВД располагают перпендикулярно вектору скорости $\vec{W}_{p,i}$ диагностируемых потоков и анализируют длительности отраженных лазерных сигналов $U_i(\tau)$ от одиночных ДВ в несущей фазе. В общем виде длительность τ_i отраженного лазерного сигнала (импульса) $U_i(\tau)$ от ДВ на выходе ОВД определяется соотношением

$$\tau_i = \tau_{f,i+} + \tau_{f,i-} + \tau_{p,i} = 2\tau_{f,i} + \tau_{p,i}, \quad (1)$$

где $\tau_{f,i+}$, $\tau_{f,i-}$ – длительности переднего и заднего фронтов импульса, обусловленных временами вхождения в зону апертуры A_d и выхода из зоны A_d ДВ, соответственно; $\tau_{p,i}$ – время нахождения всего ДВ в зоне апертуры A_d

$$\tau_{f,i} = \tau_{f,i+} = \tau_{f,i-} = A_d / \vec{W}_{p,i}, \quad (2)$$

$$\tau_{p,i} = (D_{p,i} - A_d) / \vec{W}_{p,i}, \quad (3)$$

$$\tau_i = 2A_d / \vec{W}_{p,i} + (D_{p,i} - A_d) / \vec{W}_{p,i}, \quad (4)$$

где $D_{p,i}$ – линейный размер ДВ в направлении вектора скорости его движения $\vec{W}_{p,i}$; A_d – диаметр апертуры ОВД, $A_d \leq D_{p,i.min}$.

Оценка длительности информационных импульсов $U_i(\tau)$ осуществляется при двух параметрах дискриминации k_i по уровню

$$k_i = (U_{g,i} - U_{min,i}) / U_{m,i}; \quad k_2 = 1 - k_1, \quad (5)$$

где $U_{g,i}$ – уровень дискриминации; $U_{min,i}$ и $U_{m,i}$ – минимальное значение и амплитуда i -того сигнального импульса $U(\tau_i)$, соответственно. $U_{m,i} = U_{max,i} - U_{min,i}$ – амплитуда сигнального импульса.

С учетом k_i , отношение длительности фронтов сигнального импульса $\tau_{f,i}(U_{g,i})$ на уровне дискриминации $U_{g,i}$ к длительности фронтов импульса по его основанию τ_f определяются отношением

$$\tau_{f,i}(U_{g,i}) / \tau_f = k_i U_{m,i} / U_{m,i} = k_i. \quad (6)$$

Из уравнения (2) с учетом уравнения (6) длительности фронтов сигнального импульса на произвольном уровне дискриминации можно представить в виде

$$\begin{aligned} \tau_{f,i}(U_{g,i}) &= \tau_{f,i+}(U_{g,i}) = \\ &= \tau_{f,i-}(U_{g,i}) \tau_{f,i} = k_i (A_d / W_{i,p}). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании уравнений (4) и (7) длительность импульсов информационных сигналов τ_i для различных значений k_i , равна

$$\tau_i(k_i) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(2k_i - 1) / W_{p,i}. \quad (8)$$

В соответствии с условием (5) $k_2 = 1 - k_1$ и уравнения (8) длительности сигнальных импульсов с параметрами дискриминации k_1 и k_2 соответственно равны

$$\tau_i(k_1) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(2k_1 - 1) / W_{p,i}, \quad (9)$$

$$\tau_i(k_2) = D_{p,i} / W_{p,i} + A_d(1 - 2k_1) / W_{p,i}. \quad (10)$$

Значения скорости $W_{p,i}$ и линейные размеры $D_{p,i}$ ДВ (спектр размеров) определяются из уравнений (9) и (10) в виде

$$W_{p,i} = 2A_d(2k_1 - 1) / [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{p,i} &= \{[\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)] / \\ &/ [\tau_i(k_1) - \tau_i(k_2)]\} \times A_d(2k_1 - 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Истинное объемное содержание ДВ в несущей фазе на интервале измерения T определяется из уравнения (13)

$$\varphi = \frac{1}{2T} \sum_{i=1}^n [\tau_i(k_1) + \tau_i(k_2)], \quad (13)$$

где n – число ДВ, прошедших через измерительную апертуру A_d за время T .

Важным вопросом оптимизации параметров ОВД является определенный выбор требуемой верхней граничной частоты $f_{в.гр}$ полосы пропускания ОВД. Это связано с тем, что при занижении $f_{в.гр}$ происходит «завал» фронтов сигнальных импульсов, что увеличивает погрешность определения параметров потока. С другой стороны при существенном превышении требуемой $f_{в.гр}$ увеличиваются паразитные шумы. Известно, что при треугольной аппроксимации импульса с длительностью фронта τ_f верхняя частота его частотного спектра определяется уравнением

$$f_{в.гр} = 1/0,35 \tau_f, \quad (14)$$

где τ_f – длительность фронта импульса.

С учетом (2) уравнение (14) имеет вид

$$f_{в.гр} = W_p / 0,35 A_d. \quad (15)$$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости требуемой верхней граничной частоты ОВД для многопараметровой диагностики двухфазных потоков в широком диапазоне скоростей, как функции скорости W_p и размера апертуры ОВД A_d , построенные по уравнению (15).

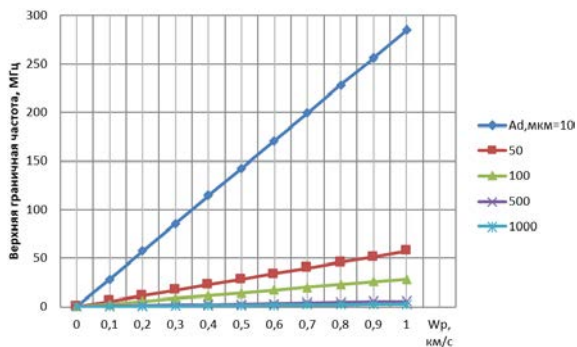


Рисунок 1 – Зависимость требуемой $f_{в.гр}$ ОВД

Автоматизированная обработка данных ОВД требует представления выходных сигналов ВОД в дискретной форме. Выбор шага дискретизации данных сигналов по времени Δt при заданной ошибке квантования по уровню ΔU является определяющим фактором для обеспечения высокой точности параметров парообразования. Согласно фундаментального принципа дискретизации процессов по теореме отсчетов (теорема Котельникова) с финитным спектром шаг дискретизации процессов с $f_{в.гр}$ определяется формулой

$$\Delta t = 1/2f_{в.гр}. \quad (16)$$

Вместе с тем наблюдаемые импульсные сигналы ВОД не относятся к классу сигналов с финитным спектром, что препятствует

использованию данного критерия, так как это приводит к утрате ряда существенных информационных признаков сигналов ВОД.

Наиболее быстрыми компонентами данных сигналов являются фронты нарастания и спада импульсов ВОД. Точность измерения фронтов существенным образом влияет на точность измерения, как скорости, так и других параметров двухфазных потоков. Разработка методики выбора шага дискретизации Δt проведена по критерию измерения скорости с заданной относительной погрешностью

$$\delta_w = \frac{\Delta W}{W_p}, \quad (17)$$

где ΔW – абсолютная погрешность измерения скорости (элемент разрешения по скорости).

Данную величину можно представить в виде

$$\delta_w = \frac{A_d}{W_p \tau_f n_d} = \frac{1}{n_d}, \quad (18)$$

где n_d – требуемое число точек дискретизации с равномерным шагом Δt по длительности τ_f .

В этой связи

$$\Delta t = \tau_f \delta_w. \quad (19)$$

Из (19) в соответствии с (15) требуемый шаг дискретизации определяется уравнением

$$\Delta t = \frac{\delta_w}{0,35 f_{в.гр}}, \quad (20)$$

при заданной погрешности δ_w с учетом верхней граничной частоты $f_{гр}$ (рисунок 1) и апертуры детектора A_d . Размер апертуры ОВД A_d определяется диаметром сердцевины используемого световода $A_d \cong D_{св}$ и выбирается из условий обеспечения требуемой разрешающей способности и обеспечения наилучшего соотношения сигнал /шум, которое при прочих равных условиях пропорционально отношению размеров (площадей) минимального ДВ $D_{p.min}$ в потоке и апертуры ОВД $D_{св}$, т.е. отношением $D_{p.min}/D_{св}$. Реализация метода на базе ОВД позволяет диагностировать различные двухфазные потоки в широком диапазоне скоростей, включая высокотемпературные потоки с чувствительностью обнаружения и определения размеров ДВ на уровне 3–5 мкм. Малое энергопотребление, габариты и вес ОВД позволяют размещать их на минироботах, сверхмалых беспилотных летательных и подводных аппаратах, наноспутниках.

1. Пат. на изобретение 20072 Республика Беларусь. МПК G01N 27/06 (2006.01). «Способ определения истинного объемного паросодержания двухфазного потока в парогенерирующих каналах»/Иванов В.И., Иванов Н.И. 27.01.2016.