УДК 621.165.66.069.83.628.84

Определение локальных расходов дисперсной среды в газожидкостном потоке с помощью счетно-импульсного метода

Канд. техн. наук БРАТУТА Э. Г., инж. ПЕРЕСЕЛКОВ А. Р.

Харьковский политехнический институт

Как на стадии лабораторных исследований, так и в период отработки головных образцов различного рода объектов теплоэнергетики возникает необходимость в определении характера распределения локальных расходов дисперсной среды в газожидкостном потоке.

Использование устройств для забора капельной жидкости из потока с последующим измерением ее расхода объемным способом [Л. 1] осложняется по мере увеличения скорости газовой фазы. Если в мерном сечении двухфазного потока (например, за направляющим аппаратом или рабочим колесом паровой турбины) наблюдается интенсивное изменение скорости, то обеспечение изокинетичности отбора пробы не представляется возможным. При выводе капель из потока влажного пара дополнительным осложнением является также необходимость использования устройств, исключающих проникновение конденсирующейся паровой фазы в мерную емкость для капель.

Большие трудности возникают и при использовании распределения по объему рабочего пространства аппарата так называемых коэффициентов орошения в форсуночных камерах кондиционеров воздуха и распылительных сушильных установках, в которых сложный характер сопряжения траекторий движения дискретной фазы исключает возможность точной ориентации заборного устройства.

Анализ и дальнейшая отработка счетно-импульсного метода Викса и Даклера [Л. 2], выполненные в [Л. 3, 4], показали, что одновременно с определением функции распределения капель по размерам представляется возможным и локальное измерение расхода дискретной жидкой фазы.

Действительно [Л. 2], в общем виде вероятность того, что капля (одна из всей совокупности), диаметр которой находится в интервале $D \div D+dD$, коснется одновременно двух электродов, находящихся на расстоянии S, имеет вид:

$$P(S,\ D)=K(S,\ D)\varphi(D)\ dD, \qquad (1)$$

где $K(S, D)$ — вероятность касания каплей заданного размера двух точек, расположенных на расстоянии S; $\varphi(D)\,dD$ — вероятность того, что диаметр произвольно выбранной капли будет находиться в интервале $D \div D+dD$; $\varphi(D)$ — функции плотности вероятности непрерывной переменной D, или, иначе, дифференциальная функция распределения числа капель по диаметру.

Если через произвольно выбранную площадку отбора пробы за достаточно большое время τ прошло $n(A, \tau)$ капель, то в соответствии с теорией вероятности в этом отборе имеется $n'(A, \tau, D)$ капель, размеры которых находятся в интервале $D \div D+dD$:

$$n'(A,\ \tau,\ D)=n(A,\ \tau)\varphi(D)\ dD. \qquad (2)$$

Из этого количества капель коснутся электродов только те, центры которых попадут в область, равную $K'(S, D)$ [Л. 2], т. е. количество касаний

$$H(S,\ \tau,\ D)=\frac{K'(S,\ D)}{A}\,n'(A,\ \tau,\ D). \qquad (3)$$

В полидисперсном потоке за время τ при фиксированном S количество таких фактов касания обоих электродов каплями, диаметр которых $D>S$, можно выразить так:

$$H(S,\ \tau)=\int_0^\infty \frac{1}{A}K'(S,\ D)\,n(A,\ \tau)\,\varphi(D)\,dD. \qquad (4)$$

Выражение для средней частоты замыканий имеет вид:

$$h(S)=\int_S^\infty K'(S,\ D)\,\varphi_0(D)\,dD, \qquad (5)$$

где $h(S)=H(\tau,\ S)/\tau$ — статически обоснованное значение средней частоты замыканий;

$$\varphi_0(D)\,dD=\frac{n\ (A,\ \tau)\ \varphi\ (D)\ dD}{\beta\tau A}$$

— количество зарегистрированных капель, размеры которых находятся в интервале $D \div D+dD$, прошедших за 1 с через 1 м² в зоне измерения; $\varphi_0(D)$ — ненормированная функция распределения числа капель по диаметру.

Значения функции $\varphi_0(D)$ определяются путем решения интегрального уравнения (5) на основании экспериментальной зависимости $h(S)$. В отличие от Викса и Даклера, которые решали интегральное уравнение (5) численно, нами было получено точное аналитическое решение вида [Л. 4]

$$\varphi_0(D)=\frac{2}{\pi D}\int_0^\infty (S^2-D^2)^{1/2}\,h^{\mathrm{IV}}(S)\,dS. \qquad (6)$$

Тогда общее число капель, проходящих за 1 с через единицу площади в точке измерения, можно определить так:

$$n=\beta\int_{S_{\text{мин}}}^\infty \varphi_0(D)\,dD. \qquad (7)$$

Соответственно объемный расход этих капель

$$g=\beta\frac{\pi}{6}\int_{S_{\text{мин}}}^\infty D^3\varphi_0(D)\,dD, \qquad (8)$$

где $S_{\text{мин}}$ — достоверно измеряемое минимальное расстояние между электродами; β — коэффициент, показывающий соотношение между действительным числом капель и количеством зарегистрированных капель.

Как показали опыты [Л. 4], изменения напряжения на электродах, чувствительности усилителя либо электропроводности жидкости вызывают пропорциональное изменение $h(S)$ во всем диапазоне зазоров. Это в свою очередь, как и следовало ожидать, не приводит к изменению нормированных функций распределения числа либо массы капель по диаметру, так как постоянный множитель сокращается при нормировке.

Коэффициент β, входящий в уравнение (7), при изменении указанных условий работы будет иметь другое значение.

Для данной жидкости и при неизменных параметрах аппаратуры коэффициент β имеет постоянное значение независимо от дисперсного состава капель. Это проверялось при различных режимах работы форсунок, вследствие чего модальный диаметр капель изменялся в диапазоне 0,04—1,5 мм. При этом отклонения от среднего значения β не превышали 15%.

Значение коэффициента β можно экспериментально определить следующим образом.

В неподвижном воздухе путем распыливания исследуемой жидкости создается поток капель, движущихся вертикально вниз. Затем с помощью диафрагмы из потока выделяют узкий пучок капель, в поперечном сечении которого с помощью счетно-импульсного метода определяется поле локальных значений объемного расхода зарегистрированных капель жидкости g':

$$g'=\frac{\pi}{6}\int\limits_{S_{\text{мин}}}^{\infty} D^3\varphi_0(D)\,dD. \qquad (9)$$

Затем, интегрируя по всему сечению, площадь которого равна F, находим значение объемного расхода зарегистрированных капель G':

$$G'=\iint\limits_{F} g'(F)\,dF. \qquad (10)$$

Действительный расход G в выделенном пучке определяется путем сепарации капель и сбора жидкости в мерную емкость, после чего искомый коэффициент β определяется как $\beta=G/G'$.

Опыты, проведенные при диспергировании воды, имеющей удельную электропроводность $1{,}8\times\times10^{-3}$ Ом$^{-1}\cdot$см$^{-1}$ при пороге чувствительности вторичной схемы регистрации импульсов 27 МВ и напряжении на электродах 6 В, позволили установить, что для данных условий $\beta=2{,}15$.

Многочисленные опыты показали, что экспериментальные значения частоты замыканий $h(S)$ хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью вида

$$h(S)=B\exp(-\alpha S), \qquad (11)$$

где B и α — коэффициенты, определяемые по графику.

В этом случае выражение (6) можно представить [Л. 4] в виде

$$\varphi_0(D)=\frac{2\alpha^3 B}{\pi}K_1(\alpha D), \qquad (12)$$

где K_1 — функция Бесселя первого порядка.

Тогда значения нормированной дифференциальной функции распределения объема (массы) капель по диаметру $v(D)$, характеризующей дисперсный состав капель, находятся по выражению

$$v(D)=cD^3\varphi_0(D)=\frac{2\alpha^4}{3\pi}D^3K_1(\alpha,\ D), \qquad (13)$$

где c — нормирующий множитель.

Соответственно, если выражение (11) подставим в (7), получим:

$$n=\beta\frac{2\alpha^2 B}{\pi}K_0(\alpha S_{\text{мин}}), \qquad (14)$$

где K_0 — функция Бесселя нулевого порядка.

Аналогично выражение (8) с учетом (12) преобразуется к виду

$$g=\beta\frac{2B}{\pi\alpha}\int\limits_{\alpha S_{\text{мин}}}^{\infty} x^3K_1(x)\,dx \qquad (15)$$

или после замены $x=\alpha D$

$$g=\beta\frac{2B}{\pi\alpha}\int\limits_{\alpha S_{\text{мин}}}^{\infty} x^3K_1(x)\,dx.$$

Можно показать, что при $S_{\text{мин}}=10$ мкм с точностью до 0,01% выполняется равенство вида

$$\int\limits_{\alpha S_{\text{мин}}}^{\infty} x^3K_1(x)\,dx\approx\int\limits_{0}^{\infty} x^3K_1(x)\,dx=\frac{3\pi}{2}.$$

Тогда выражение (15) для вычисления значения удельного объемного расхода капель, проходящих за 1 с через единицу площади в зоне измерения, преобразуется следующим образом:

$$g=\beta\frac{\pi B}{2\alpha}. \qquad (16)$$

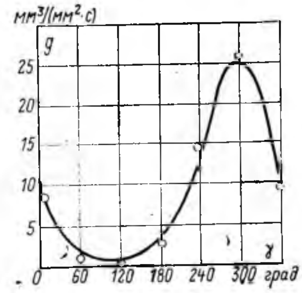
В качестве примера на рисунке показаны зависимости изменения локального расхода капель по окружности факела центробежной форсунки типа У-1 [Л. 5] с диаметром сопла 4 мм при перепаде давления $\Delta P=5$ кгс/см².

Сплошной линией показаны значения g, измеренные с помощью цилиндрической заборной трубки диаметром 5 мм с отводом жидкости в мерную бюретку. При этом выполнялись все основные требования [Л. 1] для обеспечения коэффициента эффективности улавливания, равного единице.

Для сравнения на этом же рисунке точками показаны значения локальных расходов, измеренных счетно-импульсным методом в тех же точках факела. При этом обнаруживается совпадение результатов с точностью до 15%.

Конструкция зонда-датчика и сам принцип измерения с помощью счетно-импульсного метода исключают влияние скоростей газовой фазы и капель, а также ориентации зонда на результаты измерения [Л. 3]. В связи с этим положительный результат сравнения в равной мере может быть отнесен и к объектам, где гидродинамическая обстановка в дисперсном потоке отличается от той, для которой было выполнено сравнение.

В заключение следует отметить, что надежные результаты при измерении локальных расходов капель возможны лишь при условии, когда точно измеряемое минимальное расстояние между электродами оказывается



Локальные расходы капель в разных точках по окружности факела форсунки.

меньше модального размера капель в рассматриваемой их совокупности. Это единственное ограничение области применения счетно-импульсного метода в равной мере сохраняется как при определении размеров капель, так и при нахождении локального расхода дисперсной среды. Для зонда, с помощью которого выполнялись измерения, это ограничение соответствует размерам капель не ниже 10 мкм, в то время как по «верхнему» размеру капель метод ограничений не имеет.

В процессе отработки метода было установлено, что при соответствующих параметрах измерительной аппаратуры можно производить исследование структуры потока, жидкой фазой которого является конденсат, имеющий электропроводность порядка 10^{-6} Ом$^{-1}\cdot$см$^{-1}$.

При соответствующей конструкции зонда счетно-импульсный метод может быть реализован при температуре среды до 400°С, давлении примерно 40 бар, в околозвуковом и дозвуковом дисперсном потоке.

Список литературы

1. Яблоник Р. М., Райхель Н. А. Измерение влагосодержания в воздушном потоке.— «Известия вузов. Энергетика», 1963, № 3.

2. Викс М., Даклер А. Новый метод измерения распределения размеров капель электропроводной жидкости в двухфазном потоке.— В кн.: Достижения в области теплообмена. М., «Мир», 1970.

3. Братута Э. Г., Переселков А. Р. Счетно-импульсный метод для исследования распределения капель по размерам в дисперсных потоках.— В кн.: Энергетическое машиностроение. Харьков, изд. ХГУ, 1973, вып. 16.

4. Братута Э. Г., Переселков А. Р. К вопросу о новом методе измерения размеров капель.— В кн.: Энергетическое машиностроение. Харьков, изд. ХГУ, 1974, вып. 18.

5. Кокорин О. Я. Установки кондиционирования воздуха. М., «Машиностроение», 1970.