Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова, т. /XXУП, 1978 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ИЛИ ГАЗА

Е.С.КРИЧЕВСКИЙ, Н.С.САБАДАШ, И.А.ТЮШИНА

При эксплуатации технологических систем, связанных с использованием воздушного или газового потоков (например, систем очистки промышленных газов, пневмотранспортировки сыпучих материалов, искусственного понижения влажности воздуха), существует вероятность попадания в воздухопровод капель жидкости. Это явление значительно ухудшает эффективность работы рассматриваемых систем и приводит к преждевременному износу используемой аппаратуры. Во избежание аварийной ситуации такие системы, как правило, снабжаются блоком разделения газо-жидкостной смеси. С течением времени эксплуатационные характеристики таких блоков ухудшаются, качество разделения газо-жидкостной смеси снижается, что увеличивает вероятность проскока жидкости в воздухопровод. В связи с этим в блок разделения газо-жидкостной смеси необходимо ввести устройство контроля проскока капельной жидкости. Элементом такого устройства, фиксирующим момент проскока жидкости, является первичный преобразователь.

Принципиально для решения поставленной задачи может быть использован первичный преобразователь, эквивалентное сопротивление которого зависит от количества находящейся в нем жидкости. Например, первичный преобразователь (ПП), изображенный на рис.I. Он состоит из цилиндрического корпуса, служащего наружным электродом, центрального электрода, соединенного с корпусом через изолятор, подводящего и отводящего патрубков. Обычно расстояние между электродами такого преобразователя выбирается из условия

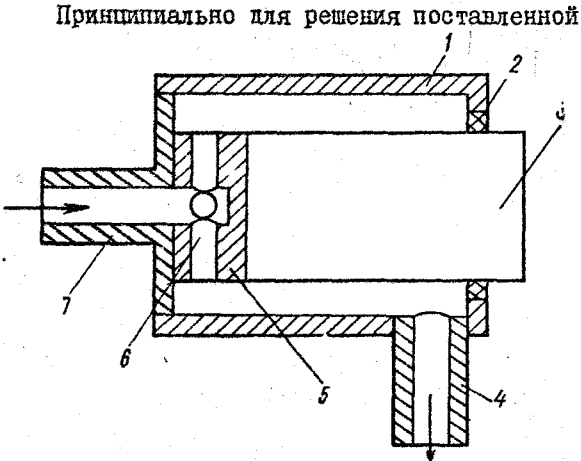


Рис.1. Структурная схема первичного преобразователя

1 - корпус; 2 - изолятор; 3 - внутренний электрод; 4 - отводящий патрубок; 5 - формирователь; 6 - отверстия; 7 - подводящий патрубок

непрерывности и равномерности потока исследуемого материала в измерительной камере. При разработке конструкции ПП для решения поставленной задачи выбор оптимального межэлектродного расстояния осложняется спецификой условий контроля и дополнительными требованиями условий эксплуатации. Дело в том, что из-за случайности процесса размеры капель, попадающих в воздухопровод и свидетельствующих об ухудшении рабочих характеристик блока разделения, совершенно различны. Поэтому первичный преобразователь должен быть чувствителен как к проскоку потока жидкости, так и к попаданию в воздухопровод отдельных капель. Кроме того, условия контроля предполагают создание регенерируемого ПП, т.е. ПП, восстанавливающего свои метрологические характеристики после каждого проскока капельной жидкости. Итак, создается явное противоречение: с одной стороны, при величине межэлектродного расстояния, превышающего минимальный размер капель, существует вероятность проскока капель, не регистрируемых ПП; с другой стороны, если величина расстояния между электродами слишком мала, то из-за наличия сил капиллярного сцепления ухудшается восстанавливаемость ПП. Указанные особенности и обусловили физические основы построения первичного преобразователя для контроля проскока капельной жидкости в воздушном потоке.

С целью обоснования теоретической модели ПП целесообразно рассмотреть качественную картину поведения капельной жидкости, лежащей на твердой поверхности, обдуваемой воздушным потоком, т.е. выяснить характер сил, действующих на каплю, и определить условия отрыва капли воздушным потоком. Вначале уточним форму рассматриваемых капель жидкости. Форма капли, покоящейся на твердой поверхности, определяется суммой действующих на нее сил: тяжести, собственного поверхностного натяжения капли и поверхностного натяжения на границе капля – твердая поверхность. Сферическими можно считать капли, радиус которых удовлетворяет неравенству

$$R \leqslant \left(\frac{\sigma}{2\rho g}\right)^{0,5}, \qquad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; ρ – плотность вещества капли.

На основании неравенства (I) форма капель воды, радиус которых $R \leqslant 1{,}92 \cdot 10^{-3}$ м, близка к шарообразной, а поведение таких капель в первом приближении подобно поведению равновеликих твердых шариков [I, 3]. Условие отрыва сферической частицы, лежащей на поверхности, обдуваемой воздушным потоком (рис.2), запишется следующим образом [I]:

$$F_л \geqslant \mu\left(F_{под} + P + F_{ад}\right), \qquad (2)$$

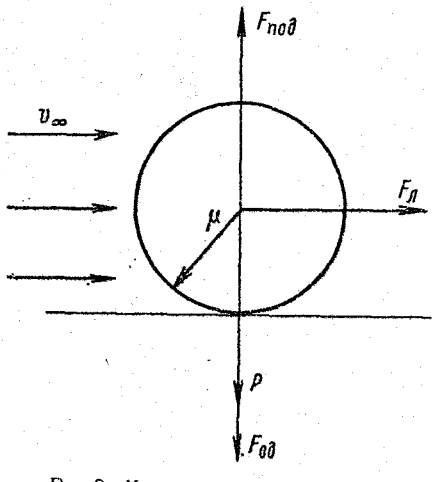


Рис.2. Упрощенная схема сил, действующих на частицу, лежащую на поверхности и обдуваемую воздушным потоком

где $F_л$ – гидродинамическая сила потока (лобовая сила); $F_{под}$ – подъемная сила воздушного потока; P – вес частицы; $F_{ад}$ – сила молекулярного (адгезионного) взаимодействия частицы с поверхностью; μ – коэффициент трения.

Тангенциальная составляющая воздушного потока для частиц небольших размеров значительно превышает нормальную составляющую, т.е. $F_{под} \ll F_л$, тогда неравенство (2) примет вид

$$F_л \geqslant \mu(F_{ад} + P) . \qquad (3)$$

В общем случае гидродинамическая сила потока определяется следующим образом [3]:

$$F_л = \frac{C_x \rho_в \pi d^2 v_r^2}{8} , \qquad (4)$$

C_x – коэффициент лобового сопротивления; $\rho_в$ – плотность воздушного или газового потока; d – диаметр обдуваемых частиц; v_r – скорость воздушного потока на уровне центра частиц.

В конкретном случае величина силы $F_л$, действующей на каплю со стороны воздушного потока, связана со структурой пограничного слоя и распределением скорости в нем. Толщина турбулентного пограничного слоя

$$\delta_т = 0{,}37 X^{0{,}8} \left(\frac{\nu}{v_\infty} \right)^{0{,}2} , \qquad (5)$$

где X – линейный размер обдуваемой поверхности; ν – кинематическая вязкость потока; v_∞ – скорость свободного потока.

Как показывает опыт эксплуатации блоков разделения газо-жидкостной смеси, скорость воздушного потока в трубопроводе может достигать 13 м/с. Тогда, согласно расчетам, толщина турбулентного слоя $\delta_т = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ м и соизмерима с размерами капель, попадающих в первичный преобразователь. Следовательно, имеет место турбулентное воздействие потока на прилипшие капли. При этом коэффициент лобового сопротивления аппроксимируется выражением [2]

$$C_x = \frac{22}{Re^{0{,}7}} , \qquad (6)$$

где Re – число Рейнольдса, а скорость на уровне центра частиц можно выразить через скорость свободного потока:

$$v_r = v_\infty \left(\frac{d}{2\delta_т} \right)^{\frac{1}{7}} , \qquad (7)$$

С учетом выражений (6) и (7) формула (4) примет вид

$$F_л = \frac{19{,}8 \rho^{0{,}44} v_\infty^{1{,}36} d^{1{,}44} \eta^{0{,}54}}{X^{0{,}14}} , \qquad (8)$$

где η – динамическая вязкость потока.

Рассматривая капли жидкости, необходимо учесть следующее:

1) капля может деформироваться под действием воздушного потока, однако этот эффект достигает заметной величины при диаметре капель $d > 2 \cdot 10^{-3}$ м [3] и поэтому влияние его при расчетах не учитывалось;

2) в капле жидкости, обдуваемой воздушным потоком, возникает циркуляция жидкости, направленная у поверхности капли в сторону, противоположную ее движению, и, таким образом, уменьшающая трение между каплей и средой, а, следовательно, и сопротивление. В этом случае выражение (8) перепишется следующим образом:

$$F_{л} = \frac{19{,}8\rho^{0{,}44} v_{\infty}^{1{,}36} d^{1{,}44} \eta\left(1 + \frac{2\eta}{3\eta_{ж}}\right)}{X^{0{,}14}\left(1 + \frac{\eta}{\eta_{ж}}\right)}, \qquad (9)$$

где $\eta_{ж}$ – вязкость жидкости, из которой состоит капля.

Сила молекулярного взаимодействия твердой сферической частицы со стенкой

$$F_{ад} = 2\pi\sigma d, \qquad (10)$$

где σ – поверхностное натяжение.

При переходе к жидким каплям характер сил молекулярного взаимодействия несколько усложняется, так как в этом случае поверхностное натяжение зависит от радиуса капли [4]:

$$\sigma_r = \sigma_{\infty}\left(1 - \frac{2}{kr} + \frac{2}{k^2 r^2}\right), \qquad (11)$$

где σ_r – поверхностное натяжение капли; σ_{∞} – поверхностное натяжение плоской поверхности; k – коэффициент, зависящий от рода поверхности, на которой расположена капля.

На основании приведенных соображений условие перемещения капли по поверхности под действием воздушного потока примет вид

$$\frac{19{,}8\rho^{0{,}44} v_{\infty}^{1{,}36} d^{1{,}44} \eta\left(1 + \frac{2\eta}{3\eta_{ж}}\right)}{X^{0{,}14}\left(1 + \frac{\eta}{\eta_{ж}}\right)} \geqslant$$

$$\geqslant \mu\left[\frac{1}{6}\pi d^3 \rho g + 2\pi d \sigma_{\infty}\left(1 - \frac{4}{kd} + \frac{8}{k^2 d^2}\right)\right]. \qquad (12)$$

Из формулы (12) можно определить минимальный диаметр d капель жидкости, перемещающихся под действием воздушного потока, движущегося с некоторой скоростью v_{∞}.

На основании изложенных теоретических соображений можно сделать следующий вывод: если на пути движения капель поместить элемент, в котором будет происходить процесс накопления капельной жидкости, то можно добиться того, что в межэлектродное пространство поступят капли, размеры которых достаточны для перемещения их в воздушном потоке.

Первичный преобразователь с таким элементом – формирователем капель схематически изображен на рис.I. Формирователь является частью внутреннего электрода и выполнен в форме цилиндрического стакана с основанием, перпендикулярным оси подводящего патрубка. В боковых стенках формирователя расположены отверстия, примыкающие к основанию цилиндра. Капли жидкости, диаметр которых меньше d, попадая на стенки и дно формирователя, удерживаются на его поверхности. При поступлении новых порций воздушного потока с капельной влагой происходит слияние мелких капель, лежащих на поверхности формирователя, в более крупные, которые, перемещаясь под действием воздушного потока, вытекают через отверстия в боковых стенках формирователя и, попадая в межэлектродное пространство, изменяют метрологические характеристики ПП.

Таким образом, при наличии формирователя величина межэлектродного расстояния определяется не минимальным размером капель, содержащихся в воздушном потоке, а максимальным размером капель, удерживающихся на поверхности формирователя при данной скорости воздушного потока. Следовательно, наличие формирователя в первичном преобразователе позволяет исключить потерю информации о каплях, размер которых значительно меньше межэлектродного расстояния, и в то же время выбрать такое расстояние между электродами, которое не препятствует восстанавливаемости ПП.

Как показывают расчеты, при скорости воздушного потока v_∞ = I3 м/с, которая реально существует при эксплуатации блоков разделения газожидкостной смеси, на поверхности удерживаются капли, диаметр которых менее $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м. С учетом этих расчетов и выбиралось расстояние между электродами описанного ПП. В ходе экспериментальных исследований выявлены достаточная чувствительность и восстанавливаемость метрологических характеристик рассмотренного ПП, что подтверждает правильность выдвинутых теоретических предположений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М., Химия, 1974.

2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов. М., Наука, 1973.

3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1955.

4. Щербаков Л.М. По поверхностным натяжениям капель малого размера. Коллоидный журнал, 1952, т. 14, № 5.