

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 541.183

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ИМПАКТОР С УНИПОЛЯРНОЙ ЗАРЯДКОЙ КАПЕЛЬ

© 2019 г. А. В. Загнитько, Н. П. Зарецкий, А. В. Каникевич, И. Д. Мацуков

Поступила в редакцию 13.12.2018 г.

После доработки 16.01.2019 г.

Принята к публикации 20.01.2019 г.

DOI: 10.1134/S0032816219040189

Разработан быстродействующий импактор для измерения массовой, поверхностной и счетной концентрации грубодисперсных капель, а также для детектирования субмикронных аэрозолей с диаметром $d \geq 0.01$ мкм. Анализ фракций капель по размерам осуществляется путем их униполярной зарядки газовыми ионами коронного разряда с последующим измерением токов переноса, возникающих при осаждении заряженных капель на токопроводящие дисковые подложки инерционных каскадов импактора [1]. По величине токов с подложек каскадов можно определить распределение концентрации капель по диаметру и концентрации в режиме текущего времени.

Импактор содержит (рис. 1) устройство для униполярной зарядки капель *1* положительными газовыми ионами в зоне коронного разряда, соединенное с шаровым пневматическим электроклапаном *2* с временем открывания менее 0.1 с; разборные инерционные каскады *3* в количестве $i = 2-6$ с круглыми соплами и дисковыми подложками из пористого никеля или стекловолокна. На выходе из импактора установлен электропроводящий фильтр *4* из пористого никеля или стекловолокна с эффективностью улавливания $>99.9\%$ заряженных капель с $d \geq 0.01$ мкм, а также отсеchnый электроклапан *5* с временем открывания ~ 0.05 с, подключенный к аспиратору с расходом $Q = 0.5-2.5$ л/с. Диаметр сопел инерционных каскадов $D = 5-20$ мм, а расстояние W от торца сопла до подложки $5-20$ мм [1]. Зарядное устройство *1* выполнено в виде коронирующей проволоки с радиусом $r = 50-75$ мкм, натянутой вдоль оси заземленного цилиндра радиусом $R = 1.5-2$ см и длиной $L = 5-8.5$ см.

Электронный блок импактора содержит высоковольтный источник напряжения, подключенный к зарядному устройству с ограничителем тока; систему управления термопарой и отсеchnыми электроклапанами; измеритель тока коронного разряда (≤ 50 мкА) и токов переноса униполярно-заряженных капель I_i с подложек каскадов *3* и

электропроводящего фильтра *4*; преобразователь усиленного токового сигнала в цифровой, а также микропроцессор для формирования сигналов, подключенный к интерфейсу RS-485. Данные передаются каждые 10–20 мс по витой паре к компьютеру, удаленному на безопасное, до 1200 м, расстояние и соединенному с сервером оптоволоконной линией длиной до 10 км с сетевым интерфейсом 100 Мбит Ethernet. Программное обеспе-

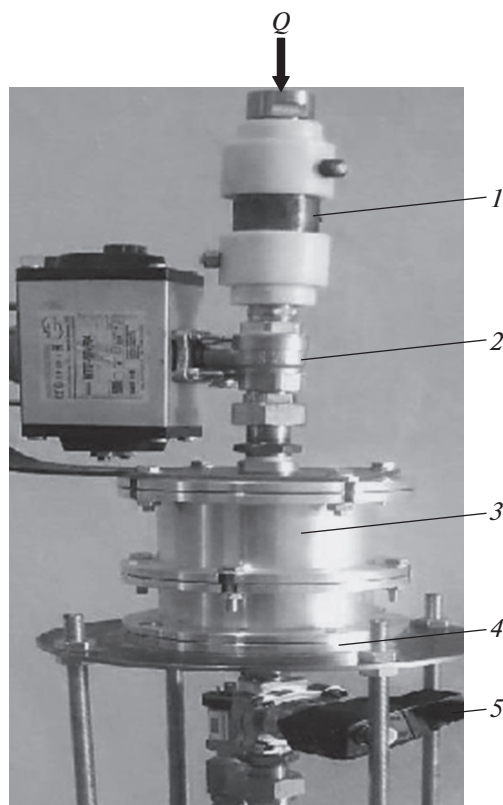


Рис. 1. Фотография быстродействующего импактора. 1 – устройство для униполярной зарядки капель в коронном разряде; 2 – пневматический электроклапан; 3 – инерционные каскады; 4 – электропроводящий фильтр; 5 – отсеchnый электроклапан.

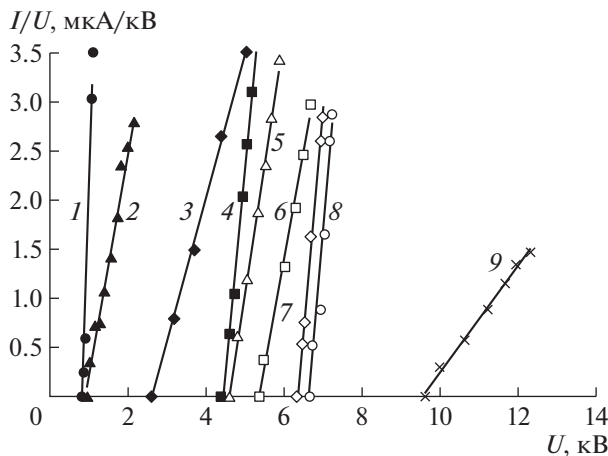


Рис. 2. Редуцированные характеристики коронного разряда I/U в зависимости от величины положительного напряжения U для электроположительных (Ne, He, Ar, CH₄, N₂, пары сжиженного природного газа (с.п.г.)) и электроотрицательных (воздух с парами с.п.г., SF₆) газов при 20°C: 1 – Ne, $U_0 \approx 0.84$ кВ; 2 – He, $U_0 \approx 0.95$ кВ; 3 – Ar, $U_0 \approx 2.63$ кВ; 4 – смесь 12% об. метана + 88% об. воздуха, $U_0 \approx 4.4$ кВ; 5 – воздух, $U_0 \approx 4.57$ кВ; 6 – смесь 12% об. метана + 88% об. азота, $U_0 \approx 5.4$ кВ; 7 – пары с.п.г., состоящего из $\approx 94\%$ об. метана + 6% об. этана, пропана, бутана, пентана и т.п., $U_0 \approx 6.4$ кВ; 8 – 99.9% об. метана, $U_0 \approx 6.6$ кВ; 9 – SF₆, $U_0 \approx 9.53$ кВ.

чение позволяет сохранять результаты в компьютере сервера. Для анализа капель в атмосфере используется блок подвески импактора на мачте и/или тросе на высоте ≤ 50 м.

Известно [1], что эффективность инерционного осаждения капель на дисковую подложку импактора определяется числом Стокса: $Stk = \tau(p)V/D$, где $\tau(p) \approx \rho d^2 C / (18\eta)$ – время релаксации капли, для которой сила сопротивления среды определяется формулой Стокса; $V = 4Q/(\pi D^2)$ – скорость газа из сопла; ρ – плотность частицы; $W = D$ – расстояние от торца сопла до подложки; C – поправка Каннигема на скольжение газа; η – его динамическая вязкость.

Параметры коронного разряда зависят от химического состава, плотности и температуры газа. Известно [2], что редуцированные таундсеновские характеристики для устройства 1 аппроксимируются выражением: $I/U = A(U - U_0)$. Здесь I – ток коронного разряда; U_0 – начальное напряжение зажигания коронного разряда; U – текущее напряжение; $A \approx 8\pi\epsilon_0\mu/(R^2\ln(R/r))$, где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, μ – подвижность газовых ионов.

На рис. 2 приведены измеренные значения I/U и U_0 для девяти электроположительных и электроотрицательных газов в устройстве 1, имеющем

следующие размеры: $r = 0.005$ см, $R = 1.5$ см и $L = 8.5$ см. Значения I передавались каждые 10 мс в компьютер, удаленный на расстояние 1200 м. Анализ данных на рис. 2 показал, что изменение U_0 от типа газа согласуется с данными Пашена для плоских электродов [2].

Зарядка каплей осуществляется во внешней зоне униполярного коронного разряда с практически постоянным распределением напряженности электрического поля E и плотности тока $J = \sigma E$, где σ – электрическая проводимость газа в зоне зарядки [1–3]. Скорость электризации капель определяется напряженностью E и параметром зарядки $\sigma\tau$, где τ – время их электризации [1–3]. Средний заряд каплей $\langle q \rangle$ можно рассчитать как сумму средних зарядов, согласно диффузионно-ударному $\langle q \rangle_D$ и ударному $\langle q \rangle_E$ механизмам зарядки.

При $\sigma\tau > 5 \cdot 10^{-10}$ (Ом · м)⁻¹ · с и $E \geq (5-10) \cdot 10^4$ В/м заряд $\langle q \rangle_E \gg \langle q \rangle_D$ для капель с $d > 4-5$ мкм [1–3]. В результате, согласно расчетам Потенье, капли заряжаются до заряда насыщения: $\langle q_{\max} \rangle_E \approx \epsilon_0 \pi \langle d^2 \rangle E [1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)]$, где $\langle d^2 \rangle$ – усредненный квадрат диаметра капель; ϵ – их диэлектрическая проницаемость [1–3]. Соответственно ток переноса будет равен $I_i \approx Q N_i \langle q_{i, \max} \rangle_E$. Это позволяет определить распределение поверхностной концентрации грубодисперсных капель по каскадам как $S_i = \pi N_i \langle d_i^2 \rangle$, а также их счетную N_i и массовую M_i концентрации в зависимости от диаметра капель d_i , осевших на подложке i каскада. Величина d_i определяется из числа Стокса и данных калибровки импактора.

Импактор имеет следующие основные характеристики. Ток коронного разряда в воздухе не превышает 10–15 мкА при напряжении $U = 5.5-6$ кВ. Измеряемый диапазон токов переноса $I_i = 10^{-5}-10$ мкА. Время бысродействия импактора зависит от расхода Q и в диапазоне $Q = 0.5-2.5$ л/с варьируется от 0.3 до 1 с. Конструкция импактора выдерживает избыточное давление во фронте ударной волны до 10^5 Па и напор воздуха ≤ 300 м/с. Прибор оснащен термопарой хромель–алюмель с бысродействием 0.15 с для измерения температуры воздуха, устойчив к воздействию магнитного поля с напряженностью до 200 А/м и промышленной частотой 50–60 Гц.

Разработанный импактор использовался для измерения эффективности улавливания капель масляного тумана диаметром $\approx 0.2-0.5$ мкм фильтрами тонкой и высокой очистки, а также для анализа грубодисперсных капель турбинного масла с $d \leq 100$ мкм при испытании грубых фильтров, согласно ГОСТ Р 51251-1999. Субмикронные капли получали с помощью туманообразователя, работающего по принципу барботаж, согласно ГОСТ 12.4.157-75, а грубодисперсные –

пневматическим распылителем “Wagner”. Данные в компьютер, удаленный на расстояние 1200 м, передавались каждые 10 мс. Результаты измерения эффективности фильтров удовлетворительно согласуются с данными их нефелометрического анализа, согласно ГОСТ 12.4.157-75.

При анализе двухфазных выбросов и облаков капель их униполярный объемный заряд создает электрическое поле, вектор которого направлен встречно электрическому полю коронного разряда. Если его величина соизмерима с величиной объемного заряда газовых ионов, то наблюдается “запирание” коронного разряда [2]. На рис. 3 приведены измеренные значения тока короны от времени в устройстве 1 с размерами $r = 0.005$ см, $R = 1.5$ см и $L = 6.5$ см при $U = 5.7$ кВ. Резкое снижение тока I обусловлено аспирацией потоков субмикронных (пик А) и грубодисперсных (пик Б) капель авиационного керосина ТС-1 в зону коронного разряда. Их объемный заряд был близок к величине заряда газовых ионов en_i , где $n_i \approx 10^{15}$ ионов/м³ — характерная концентрация ионов в зоне коронного разряда, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона [1, 2]. Отметим, что измеренная концентрация ненасыщенных паров керосина составляла менее 10–15 г/м³ при $T = 16$ – 18°C . Наличие этих паров несущественно влияло на величину I по сравнению с влиянием объемного заряда капель.

Эффект “запирания” короны затрудняет использование быстродействующего импактора, тем не менее, позволяет каждые ≈ 100 мс оценивать массовую концентрацию капель известного размера в аэрозольных выбросах. Отметим, что в процессе распыления топливных жидкостей капли приобретали биполярный заряд, величина которого была существенно меньше значений $\langle q \rangle$ капель в коронном разряде.

Разработана сеть быстродействующих импакторов с визуализацией на местности системой ГЛОНАСС-GPS для проведения масштабных экспериментов, связанных с моделированием аварий в системах хранения топливных жидкостей массой более нескольких сотен тонн. При импульсном распылении топливных жидкостей в атмосферу с образованием двухфазных турбулентных выбросов была измерена концентрация капель диаметром менее 100–120 мкм, а также массовая доля субмикрон-

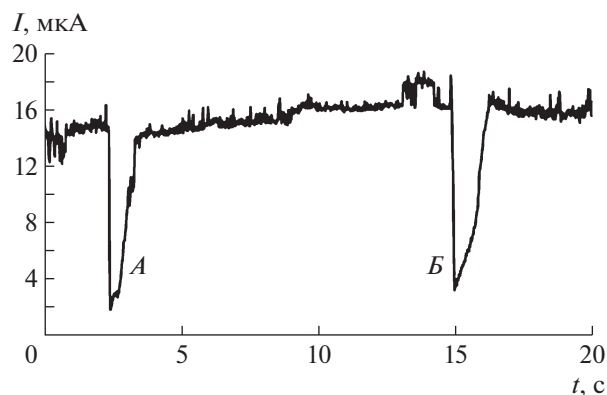


Рис. 3. Измеренные значения тока короны I от времени t при аспирации воздуха в зону коронного разряда с расходом $Q = 500$ см³/с: пик А — аспирация субмикронных капель керосина с $d \approx 0.2$ – 1 мкм и $M \approx 2$ – 3 г/м³; пик Б — аспирация грубодисперсных капель керосина с $d \approx 20$ – 100 мкм и $M \approx 400$ – 600 г/м³. Скорость движения в зоне коронного разряда около 0.7 м/с, время зарядки капель $\tau \approx 0.1$ с, величина параметра зарядки $\sigma \tau \approx (2$ – $3) \cdot 10^{-9}$ (Ом $\cdot$ м)⁻¹ $\cdot$ с.

ных капель с $d < 3$ мкм. Исследованы их флуктуации в процессе развития и распада затопленных двухфазных струй с начальной скоростью > 100 м/с, длиной 100–150 м и объемом 10^4 м³.

Сеть быстродействующих импакторов с их визуализацией на местности может быть использована для дистанционного мониторинга двухфазных выбросов и облаков в атмосфере и экологического контроля промышленных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 1987.
2. Капцов Н.А. Электрические явления в газах. М., Л.: Гостехиздат, 1947.
3. Загнитко А.В., Кириш А.А., Стечкина И.Б. // Журнал физической химии. 1988. Т. 62. № 11. С. 3058.

Адрес для справок: Россия, 123182, Москва, площадь И.В. Курчатова, 1, НИЦ “Курчатовский институт”, Курчатовский комплекс промышленной безопасности. E-mail: zagnitko_av@nrcki.ru