

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 541.183

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ АНАЛИЗАТОР
ПОВЕРХНОСТНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКИХ И КРУПНЫХ КАПЕЛЬ
В АЭРОЗОЛЬНОМ ПОТОКЕ

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

Поступила в редакцию 13.12.2018 г.

После доработки 16.01.2019 г.

Принята к публикации 20.01.2019 г.

DOI: 10.1134/S0032816219040347

Разработан лазерный анализатор капель в облаках и в двухфазных турбулентных выбросах со скоростью до 300 м/с, предназначенный для дистанционного измерения оптической плотности капель $D = \lg(I_0/I)$ и поверхностной концентрации $S = \pi \langle d^2 \rangle n$ мелких и крупных капель, а также их стандартного отклонения $\sigma(D)$ и $\sigma(S)$. Здесь I_0 и I – соответственно интенсивность лазерного излучения без и в присутствии капель, $\langle d^2 \rangle^{0.5}$ – их среднеквадратичный диаметр, n – счетная концентрация [1, 2].

Лазерный анализатор капель содержит (рис. 1) два параллельных измерительных канала I и II для одновременного измерения поверхности соответственно мелких и крупных капель, а также инерционный сепаратор III крупных капель, установленный на входе аэрозольного потока в канал I. Каждый измерительный канал включает в себя систему подвески 1 на тресе или мачте на высоте до 50 м, полупроводниковый лазер 2 с коллиматором в зоне анализа 3 капель, фотодиод 4 с коллиматором для регистрации излучения, электронный блок 5 для управления излучателем 2 и приемником излучения 4 с системой оцифровывания и передачи сигнала с помощью витой пары к удаленному компьютеру. Прямоугольный корпус 6 выполнен в виде швеллера из пластика или металла и имеет прямоугольное отверстие для конвективного двухфазного потока капель и воздуха в зону анализа 3. Сепаратор III содержит прямоугольный канал 7 постоянного сечения с установленным в нем пористым цилиндром 8 для поперечного обтекания аэрозольным потоком. Для длительной эксплуатации и устранения возможного осаждения капель на поверхность линз объективов лазеров и фотодиодов предусмотрена система их обдува чистым воздухом.

Пористый цилиндр 8 диаметром D , равным ~ 3.5 см, из волокнистого полиэстера предназначен для инерционного улавливания крупных ка-

пель с впитыванием жидкого фильтрата внутри пористой структуры для устранения их срыва с поверхности цилиндра и дробления воздушным потоком с образованием вторичных капель. Емкость его пористой структуры для поглощения жидкого фильтрата превышает 2 г/см.

При обтекании цилиндра δ эффективность захвата крупных капель с траекторией движения, близкой к прямолинейной, составляет $E \approx 100\%$. Основным параметром, определяющим инерционное осаждение более мелких капель, является число Стокса $Stk = \tau V/D$. Здесь $\tau \approx \rho_k d^2 C / (18\eta)$ – время релаксации капли, для которой сила сопротивления среды определяется формулой Стокса [1, 2]; V – скорость газа вдали от цилиндра; ρ_k – плотность жидкости капли; d – ее диаметр; C – поправка Каннигема на скольжение газа; $\eta \approx 1.8 \cdot 10^{-4}$ П – динамическая вязкость воздуха при 20°C; $\rho \approx 0.00129$ г/см³ – его плотность при той же температуре. Отметим, что при числе Рей-

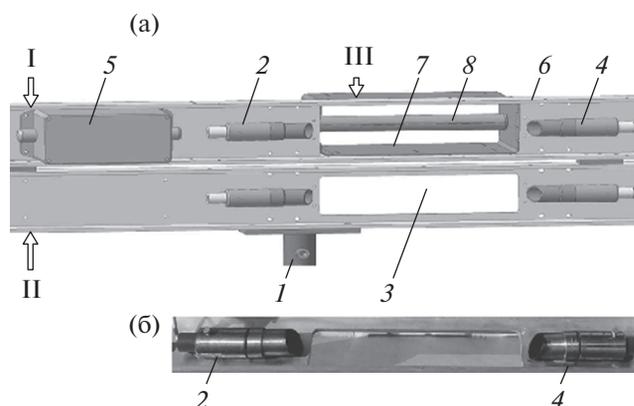


Рис. 1. Схема двухканального лазерного анализатора капель (а) и фотография фрагмента зоны оптического анализа капель (б).

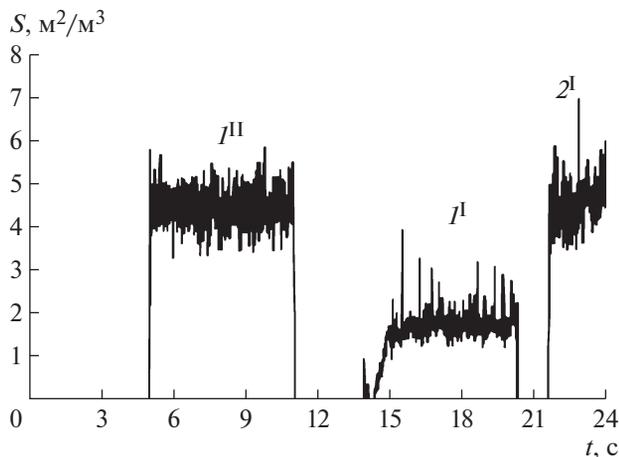


Рис. 2. Измеренные значения поверхностной концентрации S мелких и крупных капель с $d \approx 1\text{--}4000$ мкм от времени t при распылении раствора глицерина ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) с массовой концентрацией KI порядка 2 масс. %. I^{II} и 2^{I} — суммарные значения поверхностной концентрации S соответственно мелких и крупных капель в каналах II и I без цилиндра δ ; I^{I} — поверхностная концентрация мелких капель после сепарации крупных капель пористым цилиндром δ перед каналом I.

нольдса $\text{Re} = \rho DV/\eta > 1000$ размер пограничного слоя составляет $\sim D/(2(\text{Re})^{1/2})$, а эффективность $E \approx 50\%$ при $\text{Stk} = 1.6$. Если $\text{Stk} > 10$, влияние пограничного слоя незначительно и $E \geq 90\%$ [1, 2]. Критическое число Стокса с учетом пограничного слоя равно ≈ 0.25 [1, 2].

Согласно теории рассеивания плоской электромагнитной волны [1, 3], половина ослабления падающего на однородную крупную сферу ($d \gg \lambda$) потока энергии обусловлено дифракцией волн длиной λ на ее контуре, а другая — рассеиванием за счет отражения и поглощения. Известно [1, 3], что ослабление излучения в дисперсной среде, согласно закону Ламберта—Бугера—Беера, можно рассчитать по формуле $I = I_0 \exp(-KL)$, где K — объемный коэффициент ослабления. Это справедливо при однократном рассеянии света каплями или в случае, когда его многократным рассеиванием можно пренебречь, а также при расстоянии между каплями более $(4\text{--}5)d$ и для достаточно большого числа рассеивателей $nL\pi d_1^2/4 \gg 1$ в оптической зоне 3 диаметром d_1 и длиной L [3]. Коэффициент $K = F(Z, d/\lambda)(S/4)$, где $Z = \pi d d_1/(2\lambda L)$, а $F(Z, d/\lambda)$ — функция, которая учитывает индикатрису рассеивания излучения каплями и размеры анализатора [3].

При $Z \rightarrow 0$ или 1 значения $F(Z, d/\lambda) \rightarrow 2$ или 1.5 соответственно. В случае $Z \gg 1$ функция $F(Z, d/\lambda) \rightarrow 1$, и выраженное через поверхностную концентрацию капель ослабление света составит

$I \approx I_0 \exp(-SL/4)$. Для полидисперсных капель $D = SL/9.2$, а их массовая концентрация $M = Spd^*/6$ в приближении, что вклад от каждой из групп капель в D аддитивен. Здесь $d^* = \langle d^3 \rangle / \langle d^2 \rangle$ и $\langle d^3 \rangle^{1/3}$ — средний массовый диаметр капель [1–3].

Анализатор имеет следующие основные характеристики. Его быстродействие составляет 5–10 мкс, диапазон измерения $D \approx 0.03\text{--}3.5$, а максимальная измеряемая концентрация капель $S \leq 150\text{--}200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при их объемной концентрации < 0.1 об. % и длине оптической зоны $L = 15\text{--}27$ см. Лазерный анализатор устойчив к воздействию магнитного поля с напряженностью до 200 А/м и промышленной частотой 50–60 Гц, выдерживает избыточное давление во фронте ударной волны до 10^5 Па, а также скоростной напор воздуха до 300 м/с. Анализатор позволяет измерять температуру газа от -100 до 60°C термопарой хромель—алюмель с быстродействием ≤ 0.15 с, а также определять соотношение поверхностных концентраций S относительно мелких, с $d < 10\text{--}20$ мкм, и более крупных капель.

Лазерные анализаторы капель использовались для исследования биологически активных капель солей галогенидов щелочных металлов (NaCl, KI, KBr, KCl и т.п.) для галотерапии [4], мониторинга турбулентных двухфазных струй в атмосфере и внутри помещений, а также при анализе субмикронных капель для испытания аэрозольных фильтров, согласно ГОСТ Р 51251-1999.

На рис. 2 приведены измеренные значения поверхностной концентрации мелких и крупных капель с $d \approx 1\text{--}4000$ мкм от времени t при распылении раствора глицерина ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) с массовой концентрацией KI порядка 2 масс. % модифицированным распылителем ЭКРП-600/0.8 с расходом воздуха ~ 5 л/с и концентрацией капель $200\text{--}220 \text{ г}/\text{м}^3$. Скорость аэрозольного потока перед цилиндром δ составляла $V \approx 12\text{--}13$ м/с. Кривые I^{II} и 2^{I} соответствуют суммарным значениям поверхностной концентрации S соответственно мелких и крупных капель в каналах II и I без цилиндра δ . Среднеарифметические значения поверхностной концентрации в каналах I и II совпадали и были равны $\langle S^{\text{II}} \rangle \approx 4.25 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при $\sigma^{\text{II}}(S) \approx 0.5 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и величине $dS/dt < 1 \text{ м}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Среднее арифметическое время флуктуаций удельной поверхности капель $\langle t \rangle \approx 20 \pm 1$ мс, а их стандартное временное отклонение $\sigma(t) \approx 15 \pm 1$ мс за время распыления 600 с. Это позволяет сделать вывод о стабильной генерации биоактивных капель. Кривая I^{I} соответствует значениям поверхностной концентрации мелких капель после сепарации крупных капель пористым цилиндром δ перед каналом I. В этом случае $\langle S^{\text{I}} \rangle = 1.65 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\sigma^{\text{I}}(S) = 0.58 \text{ м}^2/\text{м}^3$, соответственно отношение $\langle S^{\text{II}} \rangle / \langle S^{\text{I}} \rangle$ составляет 2.58. Мелкие капли с $d \leq 15$ мкм и $\tau \leq 0.0007$ с практически не осаждались на цилиндре, так как

их число Стокса $Stk \leq 0.25$. Для более крупных капель, с $d = 40$ и 100 мкм, $Stk = 1.6$ и 10.3 , а эффективность $E \approx 50$ и 90% соответственно. В результате доля поверхности мелких капель, с $d < 15$ мкм, составила $< 30\text{--}32\%$ [1–3]. Это согласуется с данными инерционного анализа капель глицерина импактором с круглыми соплами и дисковыми подложками [1, 2].

Разработана сеть лазерных анализаторов с передачей данных каждые $5\text{--}10$ мкс в компьютеры, удаленные на безопасное, до 1200 м, расстояние от анализируемого облака. Собранная информация непрерывно поступает на сервер по оптоволоконной линии длиной до 10 км с сетевым интерфейсом 100 Мбит Ethernet. Программное обеспечение позволяет сохранять данные в компьютере сервера.

В процессе мониторинга помещений анализировалась оптическая плотность воздуха, содержащего капли диаметром $0.1\text{--}1$ мкм из смеси глицерина и пропиленгликоля ($C_3H_8O_2$) электронных сигарет марки Х6-Е, а также частицы дегтя и смолы различных табачных сигарет, имеющие выпуклую и вытянутую форму или частично состоящие из агрегатов размером от 0.01 до 1.5 мкм. Показано, что оптическая плотность воздуха флуктуировала в диапазоне $D \approx 0.03\text{--}3$ в зависимости от времени и места анализа. Соответственно $S \approx 1\text{--}100$ м²/м³, и концентрация субмикронных капель составила $n \approx 10^{12}\text{--}10^{14}$ штук/м³. Отметим, что полученные значения n согласуются с величинами концентрации, измеренными путем униполярной зарядки капель газовыми ионами коронного разряда и последующего измерения токов переноса заряженных частиц [1, 2].

Быстродействующая сеть лазерных анализаторов капель с визуализацией на местности системой ГЛОНАСС-GPS использовалась при проведении масштабных экспериментов, связанных с моделированием аварий в системах хранения топливных жидкостей массой несколько сотен тонн. В результате при импульсном распылении жидкостей из емкостей хранения в атмосферу была измерена поверхностная концентрация мелких и грубодисперсных капель диаметром от 5 до 5000 мкм. Установлены временные особенности высокоскоростных, до 300 м/с, двухфазных, затопленных струй диаметром до $15\text{--}20$ м, длиной более 100 м и объемом $> 10^4$ м³.

Быстродействующая сеть лазерных анализаторов капель может быть использована в технологии галотерапии, для мониторинга двухфазных выбросов и облаков капель в атмосфере и внутри помещений, а также в системах экологического контроля нефтегазовых объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 1987.
2. Синайский Э.Г., Ланига Е.А., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. М.: Недра, 2002.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
4. Велданова М.В., Скальный А.В. Йод знакомый и незнакомый. Петрозаводск: ИнтелТех, 2004.

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