

ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ

УДК 541.183

ЛАЗЕРНЫЙ АНАЛИЗАТОР СКОРОСТИ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ

© 2019 г. А. В. Загнитько, И. Д. Мацуков, Д. Ю. Федин, С. М. Вельмакин

Поступила в редакцию 13.12.2018 г.
После доработки 09.01.2019 г.
Принята к публикации 09.01.2019 г.

DOI: 10.1134/S0032816219040190

Лазерный анализатор предназначен для определения скорости турбулентных струй при мониторинге двухфазных выбросов и облаков капель углеводородов, а также других веществ путем измерения времени прохождения аэрозольным фронтом расстояния L между двумя параллельными лучами полупроводниковых лазеров.

Анализатор (рис. 1) имеет крепление 1 для его подвески на мачте или тросе и состоит из двух состыкованных корпусов 2 и 3 из швеллеров с прямоугольными отверстиями для прохождения потока аэрозольных частиц в двухканальную зону оптического анализа 7 длиной $Z = 15–54$ см, а также из электронного блока 4. Последний предназначен для анализа сигнала термопар хромель–алюмель, управления лазерами 5 и 6 и синхронного детектирования сигналов приемников излучения 8 и 9, оцифровывания данных и передачи их по витой паре к удаленному компьютеру, подключенному через оптоволоконную линию к серверу. Зона анализа 7 освещается параллельными плоскими лучами I и II шириной около 2 мм от лазеров 5 и 6. Расстояние L между лучами варьируется от 9 до 15 см.

При попадании аэрозоля в оптическую зону ослабление света обусловлено дифракцией волн, их рассеиванием за счет отражения и поглощения [1, 2]. Скорость V аэрозольного потока рассчитывается по формуле как $V = L/\tau$, где τ – время прохождения аэрозольным потоком расстояния L между лазерными лучами I и II. Величина τ регистрируется по изменению интенсивности света, измеряемого фотодиодами 8 и 9.

Диапазон измерения скорости V составляет от 1 до 200 м/с; температура двухфазного потока определяется с помощью термопары с быстродействием 0.15 с; оптическая плотность $D = \lg(I_0/I) \leq 3.5$; удельная поверхностная концентрация крупных капель $S = \pi \langle d^2 \rangle n = 9.2D/Z \leq 150 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при температуре $T \leq 55^\circ\text{C}$ [1, 2]. Здесь I_0 и I – интенсивности излучения в отсутствие и в присутствии капель, $\langle d^2 \rangle$ – средний квадрат диаметров капель, n – их

концентрация. Быстродействие системы измерения и передачи сигналов 5–10 мкс.

Анализатор устойчив к воздействию магнитного поля до 2 Э и промышленной частотой до 50–60 Гц, выдерживает избыточное давление во фронте ударной волны до 10^5 Па и напор воздуха до 300 м/с.

Анализатор использовался при работе с модельными системами и для анализа облаков и высокоскоростных выбросов в атмосферу двухфазных турбулентных струй капель воды и топливных жидкостей длиной до 100 м и объемом $>10^4 \text{ м}^3$.

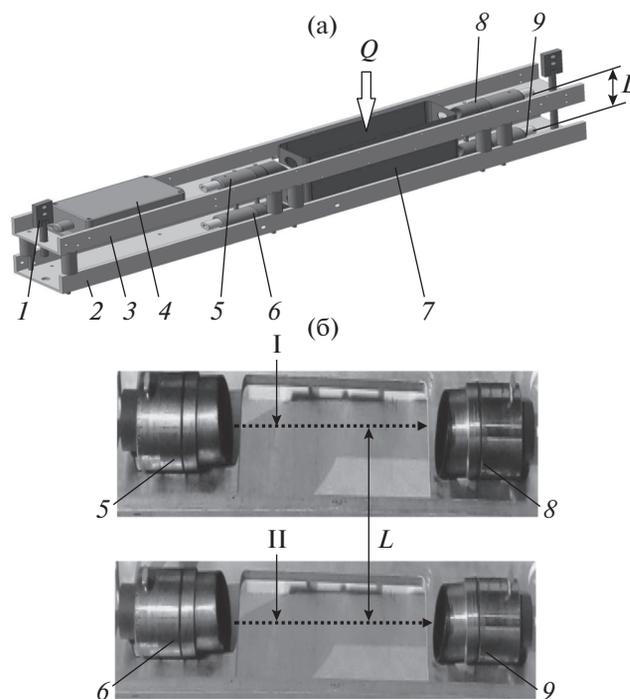


Рис. 1. Схема лазерного анализатора скорости аэрозольных потоков (а) и фотография двухканальной зоны анализа с лазерами и фотодиодами (б). Q – анализируемый аэрозольный поток в оптическую зону.

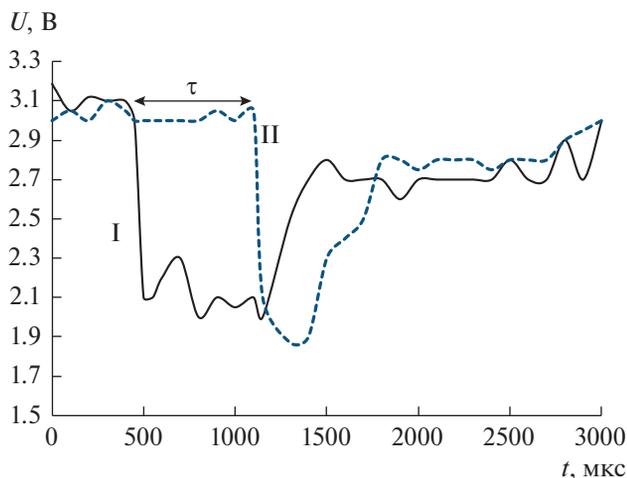


Рис. 2. Временная зависимость напряжения U на фотодиодах 8, 9 при регистрации лучей I и II соответственно в процессе движения шарика из пневматического пистолета через оптическую зону длиной $Z = 27$ см, время пролета шариком расстояния $L \approx 10$ см составило $\tau \approx 676$ мкс, его скорость $V \approx 148 \pm 5$ м/с.

При наблюдении падающих со скоростью $V \approx 1-2$ м/с шариков из свинца или силумина диаметром 4.5 мм измеренные скорости их падения практически совпали с расчетными значениями и с видеоданными измерений. Сигналы анализатора при прохождении между лучами I и II такого шарика при выстреле из пневматического пистолета приведены на рис. 2. Измеренное значение $V \approx 148 \pm 5$ м/с согласуется с паспортными данными и с результатами видеоанализа.

Измеренная скорость турбулентного аэрозольного потока на расстоянии 10–15 см от сопла пневматического генератора ЭКРП-600/0.8 составила $V \approx 11.4$ м/с. Это согласуется с измеренной термоанемометром скоростью аэрозольного потока ($\sim 11-12$ м/с). Диаметр относительно крупных капель воды равен 50–2000 мкм, а их массовая концентрация – 200–220 г/м³ при расходе воздуха 3 л/с.

Разработана сеть лазерных анализаторов скорости для сканирования аэрозольных выбросов в атмосфере по их объему. Анализаторы устанавливались на мачтах или тросах на высоте до 50 м. Экспериментальные данные передавались в компьютер, удаленный от облака на расстояние 600–

1200 м и подключенный к серверу оптоволоконной линией длиной до 10 км. Сеть была использована при экспериментах с моделированием аварий в системах хранения опасных жидкостей. Измерялась скорость движения турбулентного потока капель диаметром $\sim 50-3000$ мкм при импульсном диспергировании нескольких сотен тонн керосина с образованием в атмосфере затопленной двухфазной струи [3] объемом $> 10^4$ м³, диаметром < 20 м и длиной 80–100 м при скорости ветра 1–4 м/с и $T = 28^\circ\text{C}$. За время измерений от 0.4 до 2 с скорость на оси струи флуктуировала от 5 до 50 м/с со стандартным отклонением ~ 9.8 м/с и среднеарифметическим значением 20.5 м/с. Полученные результаты согласуются с видеоданными наблюдений о распространении аэрозольного фронта в процессе диспергирования жидкости. Измеренные величины D и S пульсировали соответственно от 0.1 до 3.5 и от 5 до 150 м²/м³.

Анализаторы позволили измерить скорость испарения при импульсных выбросах капель сжиженного природного газа с $d \approx 1-5$ мм в атмосферу при конвективном теплообмене с воздухом при $T = 20-25^\circ\text{C}$. Показано, что классические теории испарения Ленгмюра и Максвелла, а также Мейсона с учетом подвода тепла к капле за счет молекулярной теплопроводности [1] не описывают экспериментальные данные.

Сеть лазерных анализаторов аэрозольных потоков с временем быстройдействия 5–10 мкс может быть использована для мониторинга атмосферы и контроля экологической безопасности объектов нефтегазовой индустрии, а также для обоснования выбора инженерных моделей при описании турбулентного движения двухфазных затопленных струй [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райст П. Аэрозоли, введение в теорию. М.: Мир, 1987.
2. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984.

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