

УДК 53.06

**ДИАГНОСТИКА ПРИМЕСЕЙ В КАПЛЯХ ЖИДКОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**С.А. Керимбекова, Р.С. Волков

Научный руководитель: профессор, д.ф-м.н П.А. Стрижак  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [ker\\_susanna@mail.ru](mailto:ker_susanna@mail.ru)

**DIAGNOSTICS OF IMPURITIES IN LIQUID DROPLETS USING OPTICAL METHODS**S.A.Kerimbekova, R.S. Volkov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. P.A. Strizak  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: [ker\\_susanna@mail.ru](mailto:ker_susanna@mail.ru)

***Abstract.** The results of experimental studies on determining the effect of solid particles in water aerosol droplets on the interference pattern of the latter are presented. A pulsed Nd: YAG laser and a CCD video camera were used to create an interference pattern. The radii of water aerosol droplets were 10–140  $\mu\text{m}$ . We used four types of solid particles with a mass concentration of 0.003-1 g/l. Specific types of interference patterns due to the presence of impurities in the droplet are identified. The effect of the type and concentration of impurities on the integral characteristics of interference patterns (number and type) has been established. We have proposed an approach for determining the concentration and size of impurity particles based on the analysis of interference patterns.*

**Введение.** Последние десятилетия в связи с активным развитием промышленности остро поднимаются технологические, экономические и социальные проблемы, связанные с качеством очистки сточных и технологических вод. При выборе наиболее эффективного способа очистки необходимо решить задачу определения качественных и количественных характеристик примесей (загрязняющих веществ). Уже известны такие методы диагностики примесей в жидкости [1], как химические, физико-химические, органолептические, микробиологические и др. Эти методы применимы, как правило, для органических (растворимых солей) и неорганических примесей (металлы и их производные, частицы глины, ила и прочих твердых включений) [1]. Также для диагностики примесей применяются оптические методы (рефрактометрический, интерферометрические и др.), главными преимуществами над другими методами является их бесконтактность и невозмущающий характер измерений. Интерферометрических методы применимы в большом количестве практических приложений, таких как исследование размеров оптически прозрачных капель и пузырей [2-4], контроль поверхности тел [5], определение размеров непрозрачных частиц по спекловой картине [6] и другие.

**Экспериментальная часть.** Для проведения экспериментов применялся стенд, аналогичный [10,11]. С помощью распылительной форсунки ФМТ-30 генерировался полидисперсный аэрозольный поток с радиусами капель 10 – 140 нм и начальной скоростью движения около 3 м/с. Поток рассекался в

вертикальной плоскости по оси симметрии факела распыла форсунки световым ножом импульсного лазера «Quantel EverGreen 70» (длина волны – 532 нм, угол раскрытия ножа – 22°, толщина ножа – 0,2 мм, частота повторений – 4 Гц). При попадании капли аэрозоля в плоскость лазерного ножа регистрировалась интерференция (на расфокусированном изображении) между преломленным и отраженным каплей светом [2]. Регистрация интерференционных картин капель осуществлялась видеокамерой «ImperX IGV-B2020M» (разрешение кадра – 2048×2048 пикс, размер регистрационной области – 50×50 мм, расстояние от центра регистрационной области до распылительной форсунки – 0,19 м), оптическая ось которой была перпендикулярна плоскости лазерного ножа. При проведении экспериментов использовались дистиллированная (ГОСТ 6709-72), водопроводная (ГОСТ Р 51232-98) и вода с примесью твердых нерастворимых включений: диоксид титана –  $TiO_2$  (средний размер частиц –  $d_p \approx 1$  нм, средняя плотность –  $\rho_p \approx 4100$  кг/м<sup>3</sup>); оксид алюминия –  $Al_2O_3$  ( $d_p \approx 3$  нм,  $\rho_p \approx 1700$  кг/м<sup>3</sup>); порошок глины ( $d_p \approx 3,5$  нм,  $\rho_p \approx 1300$  кг/м<sup>3</sup>); полиамидные частицы трех различных размеров ( $d_p \approx 5$  нм,  $\rho_p \approx 900$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p \approx 20$  нм,  $\rho_p \approx 800$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p \approx 50$  нм,  $\rho_p \approx 700$  кг/м<sup>3</sup>). Массовая концентрация примеси в воде варьировалась в диапазоне  $G_m = 0,003 - 1$  г/л. Примесь взвешивалась лабораторными микровесами «Vibra HT 84RCE» (дискретность –  $10^{-5}$  г), после чего смешивалась с необходимым объемом воды. Приготовленный состав заливался в баллон, подключенный к распылительной форсунке, в котором создавалось избыточное давление  $10^5$  Па. Осуществлялось распыление и регистрация образов капель (интерференционных картин). Выводы относительно каждой концентрации примеси делались на основе анализа около 3000 интерференционных картин капель.

**Результаты.** В ходе обработки результатов выделены пять видов интерференционных картин капель: нормальная, угловая, кривая, гексагональная, зашумленная.

При анализе результатов рассчитывалось интегральное содержание (количество) образов (интерференционных картин) каждого типа. Далее строились гистограммы распределения образов капель в потоке. Первый тип интерференционных картин представляет образ, соответствующий прозрачной сферической капле [2]. Из гистограмм было видно, что содержание данного типа образов зависит от типа примеси. Второй тип картин соответствует несферичным каплям, количество образов практически не менялось и во всех экспериментах составляло 4 – 9 %. Интерес представляют образы третьего, четвертого и пятого типов, так как они обуславливают наличие, концентрацию и тип примеси в капле.

Установлено, что образы четвертого типа зависят, главным образом, от размера частиц примеси: при неизменном значении  $G_m$  увеличение  $d_p$  в диапазоне 1 – 50 нм приводит к росту числа образов данного типа от 3 до 19 %. При этом выполненные эксперименты показывают, что изменение  $G_m$  незначительно (в пределах 2 – 3 %) влияет на количество данных картин. Руководствуясь результатами экспериментов, а также значениями  $d_p$ , получена зависимость для оценки размеров частиц в капле по содержанию образов четвертого типа:

$$d_p = 0,6259 \cdot \exp(0,2171 \cdot N(4)), \text{ нм} \quad (1)$$

Опыты показали, что добавление в воду твердых нерастворимых частиц приводит к увеличению числа образов третьего и пятого типа. С ростом  $G_m$  их количество значительно (в несколько раз) увеличивается. Зарегистрировано, что при определенных значениях  $G_m$  прослеживается снижение числа образов третьего типа и существенный рост количества образов пятого типа (предельная концентрация, приводящая к образованию спекловых картин). Иными словами, чем крупнее средний размер частиц

примеси, тем выше значения  $G_m$ . С целью обобщения полученных результатов анализировались зависимости  $N(3+5)=f(G_m)$ . Значения  $G_q$  также могут быть определены по количеству образов первого типа. Такой подход является менее точным, так как не учитывает образы четвертого типа. Однако он значительно упрощает вычислительный процесс. Для определения параметра  $G_q$  по содержанию отдельных образов получены аппроксимационные зависимости:

$$G_q = -6,81699 \cdot 10^9 + 8,58538 \cdot 10^8 \cdot N(3+5) - 2,59886 \cdot 10^7 \cdot N(3+5)^2 + 4,10951 \cdot 10^5 \cdot N(3+5)^3, \text{ л}^{-1} \quad (2)$$

$$G_q = -4,67861 \cdot 10^8 + 8,36818 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-0,09602 \cdot N(1)), \text{ л}^{-1} \quad (3)$$

При использовании выражений (2) и (3) следует учитывать, что они могут быть применены для прогнозирования  $G_q$  в диапазоне от  $G_{q\min}$  до  $G_{q\max}$ , так как за пределами этих значений практически не наблюдается существенного изменения количества соответствующих интерференционных картин капель. Экспериментально установлено, что в первом приближении этот диапазон соответствует:  $G_q = 3 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{10} \text{ л}^{-1}$  для  $N(3+5)$  и  $G_q = 3 \cdot 10^9 - 8 \cdot 10^{10} \text{ л}^{-1}$  для  $N(1)$ .

**Заключение.** В результате проведенных исследований предпринята попытка диагностики типа и концентрации частиц твердой примеси в каплях водяного аэрозоля по их интерференционной картине. Такой интерференционный анализ позволяет по содержанию образов прогнозировать размеры частиц и их счетную концентрацию в каплях (по формулам (1)-(3)). Результаты выполненного цикла экспериментов способствуют развитию современных методов диагностики твердых нерастворимых примесей в жидкости, а также потенциально способствуют разработке перспективных газопарокапельных технологий, в частности в области термической очистки жидкостей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедова Е.Д. Методы и технические средства мониторинга, контроля качества воды в местах водозаборов и управление технологическим процессом водоподготовки в условиях изменения качества воды поверхностных водоисточников: Автореф. Дис. ... канд. т. наук. – Санкт-Петербург, 2010. – 308 с.
2. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 1. – С. 1-13.
3. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное определение времени сохранения пониженной температуры парогазовой смеси в следе капель воды, движущихся через продукты сгорания // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 12. – С. 73–81.
4. Maeda M., Kawaguchi T., Hishida K. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows // Measurement Science and Technology. – 2000. – V. 11, № 12. – P. 13-18.
5. Жижин Г.Н., Никитин А.К., Рыжова Т.А., Логинов А.П. О применении голографической интерферометрии для оптического контроля поверхности твердого тела // Письма в журнал технической физики. – 2004. – Т. 30, № 21. – С. 88–94.
6. Павлов П.В., Астахов М.О., Манучаров Д.Р. // Информатика: проблемы, методология, технологии. Материалы XVIII Международной научно-методической конференции. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 189-194.