

Дмитрий Николаевич МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>  
Илхом Шухратович ХАШИМОВ<sup>2</sup>  
Александр Анатольевич ФЕДОРЕЦ<sup>3</sup>

УДК 53.082.54

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ILIDS ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ЛЕВИТИРУЮЩИХ МИКРОКАПЕЛЬ ВОДЫ В ПРОЦЕССЕ ИХ КОНДЕНСАЦИОННОГО РОСТА

<sup>1</sup> младший научный сотрудник лаборатории микрогидродинамических технологий; аспирант, Тюменский государственный университет  
light000@yandex.ru

<sup>2</sup> младший научный сотрудник лаборатории микрогидродинамических технологий; аспирант, Тюменский государственный университет  
hoshimov1991@gmail.com

<sup>3</sup> доктор технических наук, заведующий лабораторией микрогидродинамических технологий, Тюменский государственный университет  
fedorets\_alex@mail.ru

### Аннотация

Объект исследования — диссипативная структура в виде упорядоченного монослоя микрокапель воды, левитирующих над локально нагретым, испаряющимся слоем воды. Явление получило название «капельный кластер». В кластер капли попадают из газовой среды, в которой они зарождаются и проходят стадию первичного конденсационного роста. Пространственная локализация кластера открывает качественно новые возможности для изучения сложных физико-химических процессов в микрокаплях аэрозолей. Например, скорость конденсационного роста выделенной, отслеживаемой во времени микрокапли может измеряться средствами оптической микроскопии. В данной работе впервые изучена возможность измерения диаметра капель кластера

---

**Цитирование:** Медведев Д. Н. О возможности применения метода ILIDS для измерения диаметра левитирующих микрокапель воды в процессе их конденсационного роста / Д. Н. Медведев, И. Ш. Хашимов, А. А. Федорец // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 2. С. 43-51.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-43-51

---

методом ILIDS (The Interferometric Laser Imaging Droplet Sizer). Измерения по интерференционной картине не уступают по точности прямым измерениям размера капли по ее изображению, при этом они имеют ряд преимуществ для реализации эффективных алгоритмов анализа видеопотока в автоматическом режиме.

#### **Ключевые слова**

Тепломассоперенос, водный аэрозоль, капельный кластер, испарение, конденсация, оптические измерения размера микрокапель, метод ILIDS.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-43-51**

Капельный кластер представляет собой упорядоченный монослой из микрокапель, которые левитируют над локально нагретым участком открытого горизонтального слоя жидкости [5]. Подъемная сила аэродинамической природы [1, 2, 5], удерживающая капли над межфазной поверхностью, порождается паровоздушным потоком, который формируется вследствие интенсивного испарения жидкости с нагретого участка поверхности. Находясь в этом потоке, каждая капля непрерывно увеличивается в размере за счет конденсации пара [6]. Масса капли возрастает, а высота левитации уменьшается, и когда подъемная сила становится недостаточной, чтобы уравновесить силу тяжести, капля коалесцирует со слоем. При этом на поверхности слоя образуются капиллярные волны [7] с характерной длиной порядка десятых долей миллиметра и фазовой скоростью на уровне 1,5-2 м/с. Распространяясь, волны запускают коалесценцию соседних капель, и за время менее 1 мс происходит лавинообразный коллапс кластера из десятков капель. Впрочем, конденсационный рост капель может быть замедлен или даже полностью подавлен при сравнительно небольшом внешнем инфракрасном облучении кластера [4].

Новые экспериментальные методики позволяют получать кластеры, которые состоят из заданного количества капель [10]. Для кластеров из малого числа капель характерно большое разнообразие устойчивых структур. По мере увеличения количества капель структура перестает зависеть от числа капель, и формируются кластеры с гексагональной структурой, которая обеспечивает максимально плотную упаковку сферических частиц на плоскости [9].

Характерный диаметр капель в кластере составляет десятки микрон, они идеально сферичны и, по сути, витают в газовой среде подобно каплям атмосферных аэрозолей. В тоже время пространственная локализация кластера позволяет использовать прецизионные средства измерения: оптические микроскопы и спектрофотометрические системы на их основе, тепловизоры и др. для детального изучения широкого спектра физических, химических и биологических процессов в масштабе отдельно взятой микрокапли аэрозоля [11]. Развитие такой уникальной технологии предполагает наличие средств высокоточного измерения размера капель в режиме *in situ*. В данной работе впервые экспериментально подтверждена возможность применения для этой цели оптического метода ILIDS (The Interferometric Laser Imaging Droplet Sizer) [8]. Этот относительно новый метод применим для измерения диаметра любых прозрачных

микрочастиц сферической формы: капля аэрозолей, микропузырьков, полимерных микросфер и др.

Оптическая схема метода ILIDS показана на рис. 1. При наведенном на кластер микроскопе (очевидно, что частицы должны быть подсвечены лучом лазера) каждая капля дает два ярких блика (рис. 1б, нижнее изображение), которые являются когерентными источниками света. Соответственно, если капли находятся вне фокальной плоскости оптической системы микроскопа, наблюдается характерная интерференционная структура (рис. 1б, верхнее изображение). Причем количество  $N$  интерференционных полос, при прочих равных условиях, определяется диаметром  $d$  капли [8]:

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left( \cos(\theta/2) + \frac{n \sin(\theta/2)}{\sqrt{n^2 - 2n \cos(\theta/2) + 1}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где:  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения,  $\theta$  — угол наблюдения интерференции,  $n$  — относительный показатель преломления вещества капли,  $\alpha$  — максимальный угол рассеяния, воспринимаемый оптической системой микроскопа (был определен экспериментально и составил  $0,075 \pm 0,001$  рад).

Следует отметить, что диаметр окружности, огибающей интерференционную структуру, не зависит от размера капли, но связан с фактическим положением плоскости фокусировки микроскопа (рис. 1а). Метод ILIDS может быть усовершенствован за счет дополнительной цилиндрической оптики [13], позволяющей растягивать изображение в направлении, перпендикулярном интерференционным полосам. В результате интерференционная структура трансформируется из круга в тонкую штриховую линию (количество полос остается неизменным), что в значительной мере снимает проблему наложения интерференционных структур от близко расположенных капель [13].

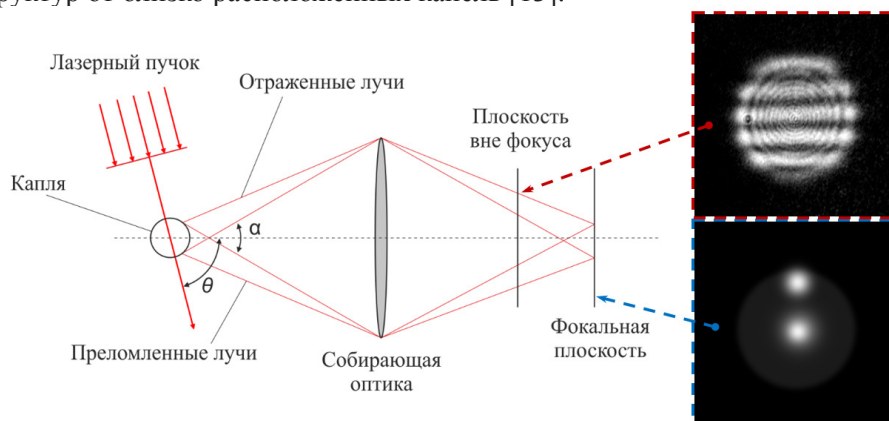


Рис. 1. (а) Оптическая схема метода ILIDS; (б) Изображения, соответствующие положению капли в плоскости и вне фокальной плоскости микроскопа

Fig. 1. (a) the optical scheme ILIDS method; (b) images of the drop's position in the plane and out of the focal plane of the microscope

Схема установки, на которой проводились измерения методом ILIDS, показана на рис. 2а. Здесь: 1 — тонкий (порядка 400 мкм) горизонтальный слой воды; 2 — цилиндрическая кювета, дно которой в центральной части представляет собой ситалловую пластину 3 толщиной 0,4 мм с зачерненной нижней поверхностью; 4 — лазерный луч, который поглощается пластиной, порождая область локального нагрева воды (над этим участком слоя формируется капельный кластер 5); 6 — оптическое окно; 7 — пучок лазера, подсвечивающий кластер; 8 — рассеянное на микрокаплях (под углами близкими к  $\theta$ ) лазерное излучение, перенаправленное зеркалом 9 в объектив микроскопа 10.

В экспериментах были задействованы следующие научно-измерительные приборы и оборудование: стереомикроскоп исследовательского класса Zeiss Discovery V16; скоростная телекамера pco.edge 5.5, лазерный триангуляционный датчик расстояния RIFTEK RF603, полупроводниковый лазер Omicron Laserage BrixX® 808-800HP (лазерный нагрев,  $\lambda = 808$  нм), полупроводниковый лазер LCM-T-111 (лазерная подсветка кластера,  $\lambda = 532$  нм), измеритель мощности лазерного пучка и энергии лазерных импульсов ThorlabsPM200.

На рис. 2б показана типичная серия интерференционных структур одной и той же микрокапли кластера в процессе ее конденсационного роста — по мере увеличения диаметра капли последовательно возрастает количество интерференционных полос.

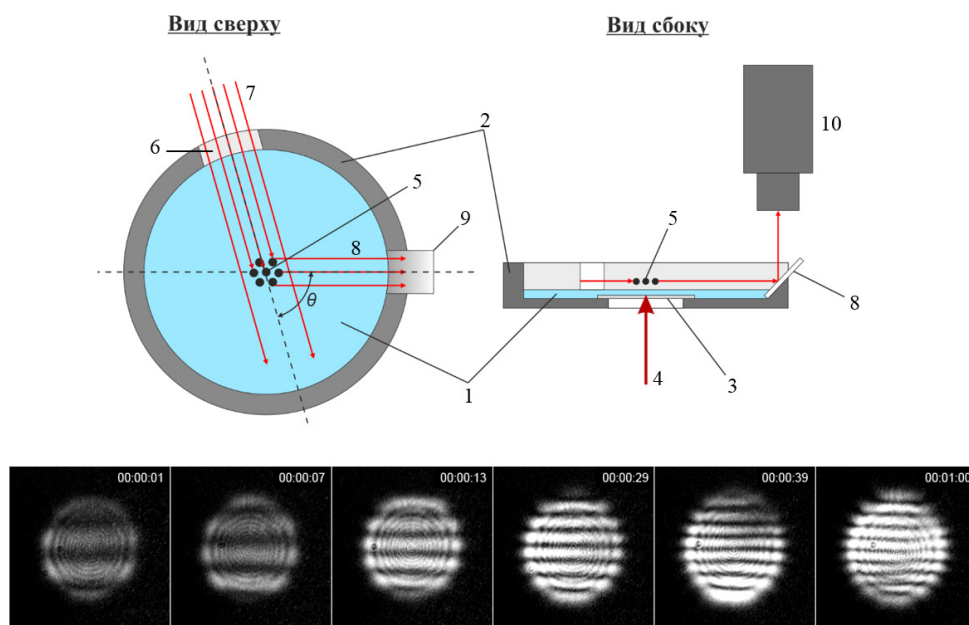


Рис. 2. (а) Схема экспериментальной установки; (б) Трансформация интерференционной структуры при конденсационном росте микрокапли

Fig. 2. (a) scheme of the experimental setup; (b) transformation of interference structures during the microwater condensation growth

В качестве теста на корректность данных эксперимента, полученных методом ILIDS в таких же условиях, были сделаны видеозаписи кластера, которые позволяли измерять  $d$  на основании непосредственного изображения капли. Полученные разными методами зависимости квадрата диаметра капли от времени приведены на рис. 3а. Как видно из графика, результаты измерений оказались весьма близкими — максимальное расхождение не превышало 5 %. Характерное для метода ILIDS некоторое систематическое занижение диаметров небольших ( $d < 40$  мкм) капель, по-видимому, обусловлено малым, причем дискретным числом  $\max/\min$  в интерференционной структуре. Ход зависимости  $d^2(t)$  линейный, что свидетельствует о выполнении в капельном кластере хорошо известной для аэрозолей закономерности — « $d^2$ -law» [12] (также она известна как правило Срезневского).

Отдельный интерес представляют данные о влиянии мощности  $P$  лазерного нагрева на скорость роста микрокапель, рис. 3б — скорость лимитирует быстроедействие любой возможной лабораторной системы стабилизации размера капель кластера во времени. В изученном диапазоне значений  $P$  скорость роста увеличивалась с 0,005 мкм/с ( $P = 165$  мВт) до 0,86 мкм/с ( $P = 720$  мВт), т. е. более чем в 170 раз, но все равно оставалась весьма низкой. Для большинства практических приложений достаточно, чтобы амплитуда отклонений диаметра капель не превышали нескольких мкм, а значит, минимальная частота измерений  $d$  должна быть порядка единиц Гц. Первоисточником информации в рассмотренных оптических методах являются кадры видеозаписи. Очевидно, что даже стандартные камеры с рабочей частотой 25 кадров/с могут быть полноценным источником управляющего сигнала для автоматизированных систем поддержания заданного диаметра капель в кластере.

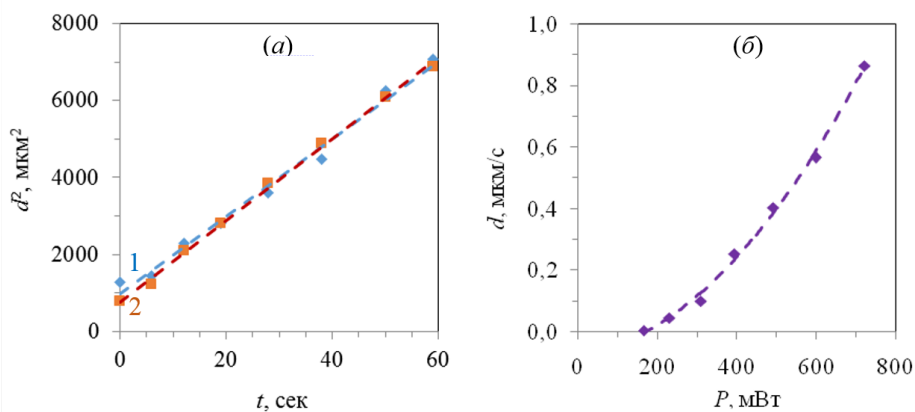


Рис. 3. Конденсационный рост капель в кластере: (а) Зависимость квадрата диаметра капли от времени. Измерения: 1 — по оптическим изображениям капель, 2 — методом ILIDS. (б) Скорость роста диаметра капель при разной мощности лазерного нагрева

Fig. 3. Condensation growth of drops in the cluster: (a) the dependence of the squared diameter of a drop from time; dimensions: 1 — optical images drops, 2 — ILIDS method; (б) drops' diameter growth rate at different power laser heating

В заключение следует отметить, что в автоматическом режиме при сопоставимой точности измерений подсчет линий в интерференционной структуре допускает использование более простых и быстрых математических алгоритмов обработки цифровых изображений (например, преобразования Хафа [3]) для поиска прямых линий — интерференционных полос), чем требуется при обработке полутонового изображения капли и расчета ее диаметра. Поэтому метод ILIDS, который применялся для измерения диаметра микрокапель кластера впервые, можно признать достаточно перспективным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислицын А. А. Аэродинамическая модель устойчивости капельного кластера / А. А. Кислицын, В. С. Пак, А. А. Федорец // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. 2009. № 6. С. 102-107.
2. Кислицын А. А. Об аэродинамической модели капельного кластера / А. А. Кислицын, А. А. Федорец // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. 2014. № 7. С. 127-136.
3. Кудрина М. А. Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении / М. А. Кудрина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 476-478.
4. Федорец А. А. Влияние инфракрасного облучения на подавление конденсационного роста капель воды в левитирующем капельном кластере / А. А. Федорец, Л. А. Домбровский, Д. Н. Медведев // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. № 7. С. 507-510.
5. Федорец А. А. Капельный кластер / А. А. Федорец // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. № 8. С. 457-459.
6. Федорец А. А. Механизм стабилизации положения капельного кластера над межфазной поверхностью жидкость-газ / А. А. Федорец // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 21. С. 63-69.
7. Федорец А. А. О роли капиллярных волн в механизме коалесценции капельного кластера / А. А. Федорец, И. В. Марчук, О. А. Кабов // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. № 5. С. 307-310.
8. Brunel M. Design of ILIDS Configurations for Droplet Characterization / M. Brunel, H. Shen // Particuology. 2013. Vol. 11. № 2. Pp. 148-157
9. Fedorets A. A. Self-Assembled Levitating Clusters of Water Droplets: Pattern-Formation and Stability / A. A. Fedorets, M. Frenkel, E. Shulzinger, L. A. Dombrovsky, E. Bormashenko, M. Nosonovsky // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Article no 1888. 6 p.
10. Fedorets A. A. Small Levitating Ordered Droplet Clusters: Stability, Symmetry, And Voronoi Entropy / A. A. Fedorets, M. Nosonovsky, M. Frenkel, E. Bormashenko // Journal of Physical Chemistry Letters. 2017. Vol. 8. № 22. С. 5599-5602.
11. Fedorets A. A. The Use of Infrared Self-Emission Measurements to Retrieve Surface Temperature of Levitating Water Droplets / A. A. Fedorets, L. A. Dombrovsky, A. M. Smirnov // Infrared Physics & Technology. 2015. Vol. 69. Pp. 238-243.
12. Sagna K. A Study of Droplet Evaporation / K. Sagna, A. D'Almeida // American Journal of Modern Physics. 2013. Vol. 2. Pp. 71-76.
13. Sahu S. Simultaneous Droplet and Vapour-Phase Measurements in an Evaporative Spray by Combined ILIDS and PLIF Techniques / S. Sahu, Ya. Hardalupas, A. M. K. P. Taylo // Exp. Fluids. 2014. Vol. 55. Pp. 1673.



**Dmitry N. MEDVEDEV<sup>1</sup>**  
**Ilkhom Sh. KHASHIMOV<sup>2</sup>**  
**Aleksandr A. FEDORETS<sup>3</sup>**

UDC 53.082.54

### **ILIDS METHOD APPLICATION FOR DIAMETER MEASUREMENT OF LEVITATING MICRO-WATER IN THE PROCESS OF THEIR CONDENSATION GROWTH**

<sup>1</sup> Junior Researcher, Laboratory of Micro-Hydrodynamic Technologies;  
Postgraduate Student, University of Tyumen  
light000@yandex.ru

<sup>2</sup> Junior Researcher, Laboratory of Micro-Hydrodynamic Technologies;  
Postgraduate Student, University of Tyumen  
hoshimov1991@gmail.com

<sup>3</sup> Dr. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of Micro-Hydrodynamic Technologies,  
University of Tyumen  
fedorets\_alex@mail.ru

#### **Abstract**

This article studies the dissipative structure, consisting of organized monolayer of water droplets, levitating above the locally heated and evaporating water layer — the phenomenon called “droplet cluster”. The droplets come to the cluster from gas environment, where they form and complete the process of primary condensing growth. Dimensional cluster localization discovers new opportunities in research of complex physical and chemical processes in mist spray droplets. For example, quickness of condensing growth of chosen, monitored during a time period droplet, can be measured by the means of optical microscopy. The author investigates the previously undescribed possibility of measuring cluster droplets diameter using the ILIDS (Interferometric Laser Imaging Droplet Sizer) method.

---

**Citation:** Medvedev D. N., Khashimov I. Sh., Fedorets A. A. 2018. “ILIDS Method Application for Diameter Measurement of Levitating Micro-Water in the Process of Their Condensation Growth”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 2, pp. 43-51.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-43-51

---

Interferometric imaging measurements are as accurate as direct imaging measurements of droplet size. At the same time, they have a number of benefits for realization of effective automatic video stream analysis algorithms.

### **Keywords**

Heat and mass transfer, water mist spray, dripping cluster, evaporation, condensation, optical dimensional changes of droplets, ILIDS method.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-43-51**

### **REFERENCES**

1. Kislitsyn A. A., Pak V. S., Fedorets A. A. 2009. "Aerodinamicheskaya model' ustoychivosti kapel'nogo klastera" [Aerodynamic Model Sustainability Cluster Drip]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no 6, pp. 102-107.
2. Kislitsyn A. A., Fedorets A. A. 2014. "Ob aerodinamicheskoy modeli kapel'nogo klastera" [On the Drip Aerodynamic Model Cluster]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no 7, pp. 127-136.
3. Kudrina M. A. 2014. "Ispol'zovaniye preobrazovaniya Khafa dlya obnaruzheniya pryamykh liniy i okruzhnostey na izobrazhenii" [Using Hough Transformation to Detect Lines and Circles on the Image]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, vol. 16, no 4, pp. 476-478.
4. Fedorets A. A., Dombrovskiy L. A., Medvedev D. N. 2015. "Vliyaniye infrakrasnogo oblucheniya na podavleniye kondensatsionnogo rosta kapel' vody v levitiruyushchem kapel'nom klasterе" [The Influence of Infrared Irradiation on Growth Suppression of Condensation Water Drops in Levitating Drip Cluster]. Pis'ma v ZH·ETF, vol. 102, no 7, pp. 507-510.
5. Fedorets A. A. 2004. "Kapel'nyy klaster" [Drop Cluster]. Pis'ma v ZH·ETF, vol. 79, no 8, pp. 457-459.
6. Fedorets A. A. 2012. "Mekhanizm stabilizatsii polozheniya kapel'nogo klastera nad mezhfaznoy poverkhnost'yu zhidkost'-gaz" [Stabilization Mechanism of the Cluster over Drip Interphase Surface Liquid-Gas]. Pis'ma v ZH·ETF, vol. 38, no 21, pp. 63-69.
7. Fedorets A. A., Marchuk I. V., Kabov O. A. 2014. "O roli kapillyarnykh voln v mekhanizme koalestsentsii kapel'nogo klastera" [On the Role of Capillary Waves in the Mechanism of Coalescence Drip Cluster]. Pis'ma v ZH·ETF, vol. 99, no 5, pp. 307-310.
8. Brunel M., Shen H. 2013. "Design of ILIDS Configurations for Droplet Characterization". Particuology, vol. 11, no 2, pp. 148-157.
9. Fedorets A. A., Frenkel, M., Shulzinger E., Dombrovsky L. A., Bormashenko E., Nosonovsky M. 2017. "Self-Assembled Levitating Clusters of Water Droplets: Pattern-Formation and Stability". Scientific Reports, vol. 7, article no 1888.
10. Fedorets A. A., Nosonovsky M., Frenkel M., Bormashenko E. 2017. "Small Levitating Ordered Droplet Clusters: Stability, Symmetry, and Voronoi Entropy". Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 8, no 22, pp. 5599-5602.
11. Fedorets A. A., Dombrovsky L. A., Smirnov A. M. 2015. "The Use of Infrared Self-Emission Measurements to Retrieve Surface Temperature of Levitating Water Droplets". Infrared Physics Infrared Physics & Technology, vol. 69, pp. 238-243.



12. Sagna K., D'Almeida A. 2013. "A Study of Droplet Evaporation". *American Journal of Modern Physics*, vol. 2, pp. 71-76.
13. Sahu S., Hardalupas Y., Taylo A. M. K. P. 2014. "Simultaneous Droplet and Vapour-Phase Measurements in an Evaporative Spray by Combined ILIDS and PLIF Techniques". *Experiments in Fluids*, vol. 55, pp. 1673.