



**Одиннадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 27 — 30 июня 2011 г.**

УДК 532.529

И.В. Ярыгин¹, М.Н. Андреев², Ю.Н. Вязов³

¹ *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: yarygin@itp.nsc.ru*

² *Новосибирский государственный университет, Россия,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

³ *Новосибирский государственный технический университет, Россия,
630092, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20*

**ДИАГНОСТИКА МИКРОКАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ И ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ НИХ
УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ**

Обсуждаются возможности и ограничения как оптических, так и неоптических методов диагностики капельной фазы в газокапельных потоках. Показана возможность восстановления функций распределения капель и их среднего размера из измерений параметров ультрадисперсных частиц, формирующихся из микрокапельных потоков после испарения капель. Приведены конкретные примеры получения и исследования газокапельных потоков применительно к решению задач космических и биомедицинских приложений.

**ГАЗОКАПЕЛЬНЫЙ ПОТОК, УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ, МЕТОДЫ
ДИАГНОСТИКИ**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время газокапельные потоки широко используются в различных тепло- и массообменных аппаратах и устройствах. Сюда можно отнести распыление топлива, охлаждение теплонапряженных конструкций, металлургические процессы. Показано, что добавление в охлаждающий поток даже небольшого количества капельной фазы существенно повышает эффективность охлаждения за счет использования теплоты фазового перехода при испарении капель.

Большое внимание исследованию газокапельных потоков уделяется в космических приложениях. Такие потоки возникают при работе двигателей управления космических аппаратов и при продувках магистралей дозаправки компонентами топлива космических станций. При этом важны не только исследования структуры течения газокапельных потоков в вакууме, но и динамика испарения капель разного размера и состава.

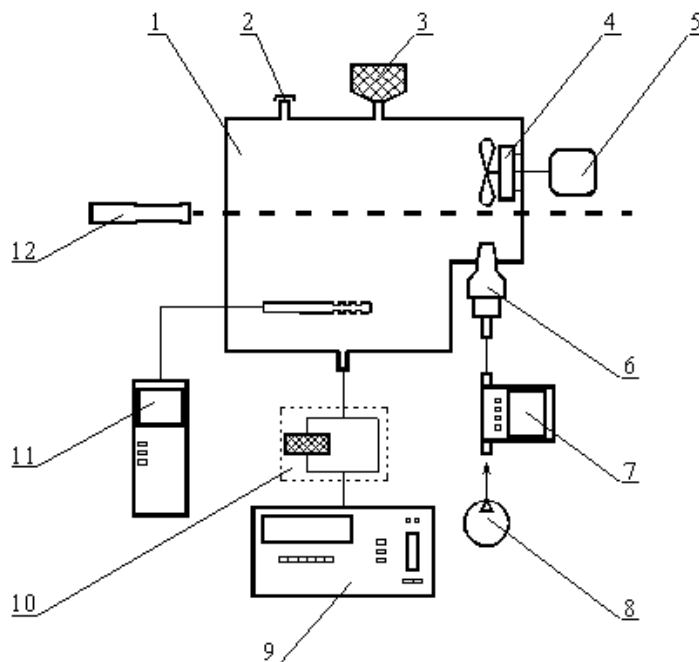
Хотя исследования газокапельных потоков, как следует из анализа литературных данных, выполнены в весьма широких диапазонах режимных параметров по температуре, давлению, составу, числам Рейнольдса, Вебера, Маха и др., можно констатировать, что спектр научных и практических приложений газокапельных потоков непрерывно расширяется. К числу возможных применений газокапельных потоков вообще, и микрокапельных потоков в частности, относится получение ультрадисперсных частиц различных веществ, в том числе термически нестабильных лекарственных препаратов. Основная идея этого способа состоит в предварительном получении капель раствора нужного размера (в идеале – с монокапельной функцией распределения частиц по размеру) и

их последующего испарения в несущем газовом потоке. При этом достаточно контролировать и управлять размером первично образующихся капель (при заданной начальной концентрации раствора), чтобы получать желаемую дисперсность вещества. Оптическая диагностика, в частности по рассеянию Ми, получающихся ультрадисперсных частиц субмикронного размера представляет некоторые трудности, связанные с малыми размерами частиц (равными и меньше длины волны источника зондирующего излучения). Поэтому актуально совершенствование имеющихся и развитие новых подходов к диагностике капель, особенно микронного и субмикронного размера.

В данной работе сделана попытка восстановления функций распределения микрокапель и их среднего размера из измерений параметров ультрадисперсных частиц, образующихся после полного испарения капель.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Для проведения исследований была разработана и создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.



1 – бокс, 2 – дренажный патрубок, 3 – фильтр, 4 – вентилятор, 5 – электрический адаптер, 6 – распылитель, 7 – расходомер газа, 8 – воздушный компрессор, 9 – анализатор частиц, 10 – разбавитель, 11 – измеритель влажности и температуры, 12 – лазер

Рис. 1. Схема установки:

Установка представляет собой изготовленный из оргстекла бокс 1 объемом 22 л, в котором установлены распылитель (источник) газочапельного потока 6, измеритель влажности и температуры 11, а также вентилятор 4. Для диагностики образующихся капель и наночастиц используются лазер 12 с длиной волны $\lambda = 532$ нм или 650 нм и анализатор частиц 9. В качестве последнего использовался диффузионный спектрометр аэрозольных частиц ДСА (разработка Института химической кинетики и горения СО РАН), позволяющий проводить измерения размеров частиц в диапазонах 3-200 и 300-1200 нм при их концентрациях до $5 \cdot 10^5$ частиц/см³. При больших концентрациях частиц (близких к $5 \cdot 10^5$ частиц/см³) использовался разбавитель 10 для обеспечения работоспособности спектрометра. Метод диагностики наночастиц с помощью спектрометра основан на использовании диффузионных батарей, позволяющих путем определения коэффициента диффузии наночастиц восстанавливать их распределения по размерам (по известной зависимости коэффициента диффузии частиц от их размера). Для регистрации частиц, прошедших секцию

диффузионной батарее, они пропускаются через конденсационную камеру, где укрупняются до оптически регистрируемого размера и далее поступают в оптический счетчик. Распыление раствора осуществлялось путем его подачи в спутный поток воздуха. Расход воздуха менялся в диапазоне от 1 до 8 л/м. В экспериментах на примере растворов NaCl и лозартана в воде исследовалось влияние начальной концентрации указанных веществ на функцию распределения частиц по размерам и её эволюцию во времени.

Для определения начального размера капель использовался метод рассеяния света на каплях (рассеяние Ми [1]). Метод основан на регистрации интенсивности рассеиваемого каплями лазерного излучения. Интенсивность рассеянного света:

$$I_{pac} = A \cdot I_0 \cdot n \cdot \sigma, \quad (1)$$

где A – приборная константа, I_0 – интенсивность зондирующего света, n – число частиц в единице объема, σ – сечение рассеяния.

В теории рассеяния важным является параметр $\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda}$, характеризующий соотношение размера частиц r и длины волны зондирующего излучения λ . Если $\alpha \ll 1$, т.е. размер частиц меньше длины волны зондирующего излучения, имеет место Рэлеевское рассеяние и индикатриса рассеяния изотропна. Если размер частиц соизмерим с длиной волны зондирующего излучения, то имеет место рассеяние Ми, интенсивность которого сильно зависит от размера частиц и длины волны:

$$I_{pac} \sim \frac{n \cdot r^6}{\lambda^4}. \quad (2)$$

По мере увеличения размера частиц (при заданной величине λ) индикатриса рассеяния становится всё более вытянутой по направлению зондирующего луча и при $\alpha \rightarrow \infty$ имеет место геометрическая оптика (угол падения равен углу отражения). Из теории Ми следует, что отношение интенсивностей рассеянного света для двух равных углов относительно плоскости симметрии индикатрисы рассеяния (рассеяние «вперед-назад») является функцией только параметра α . Таким образом, если измерить интенсивность рассеянного света «вперед» и «назад» под определенным углом относительно зондирующего луча, то при известной длине волны λ можно определить средний размер частиц. Поскольку в реальных потоках почти всегда имеют место частицы разных размеров, то для получения (восстановления) функции распределения частиц по размерам необходимо измерить индикатрису рассеяния по всем углам (от 0 до 180°) с последующим решением обратной задачи, что не является тривиальным.

Поскольку интенсивность рассеянного на частицах света сильно зависит от длины волны, то желательно использовать лазер с малой длиной волны, например, ультрафиолетовый. Однако мы использовали более безопасные в работе лазеры видимой области спектра (650 и 532 нм). Для регистрации излучения использовались высокочувствительные в требуемой области спектра фотоприемники с последующим усилением сигнала. Два фотоприемника располагались через 180° в одной плоскости с лазером и могли синхронно поворачиваться на углы от 0 до 180° относительно неподвижного источника газочапельного потока и луча лазера. С помощью объективов, установленных перед приемниками, обеспечивалась пространственная локализация измерений (примерно 1 мм в приосевой области газочапельной струи). Одна из основных проблем при таком способе диагностики – высокая концентрация капель в газочапельном потоке, и, соответственно, необходимость принимать во внимание множественные переизлучения от соседних капель. В результате методика позволила оценить средний

размер капель в газокапельном потоке, который составил порядка 1 мкм. Восстановление функции распределения капель по размерам осуществлялось косвенным способом – по измеренной диффузионным спектрометром функции распределения по размерам сухих частиц в рабочей камере экспериментальной установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились следующим образом: после задания расходов газа и жидкости (выбора чисел Рейнольдса и Вебера спутного газового потока) включался источник газокапельного потока, и в течение определенного времени происходило истечение газокапельного потока в рабочую камеру. В процессе истечения проводились измерения среднего размера капель в газокапельном потоке по рассеянию Ми. Далее, после выключения источника газокапельного потока и полного испарения капель осуществлялся отбор проб из камеры для измерения среднего размера образовавшихся сухих частиц и их функции распределения по размерам. В экспериментах в качестве рабочего газа использовался воздух, в качестве рабочей жидкости – раствор NaCl и раствор лозартана (гипотензивный лекарственный препарат) в воде. Весовая концентрация вещества в воде изменялась от 1/200 до 1/8000. Начальные температуры воздуха и раствора были равны комнатной температуре. На рис. 2 приведена полученная в экспериментах зависимость среднего размера частиц, образующихся при испарении капель водного раствора лозартана, от начальной концентрации раствора. Сплошной линией на этом рисунке показаны результаты расчета среднего размера частиц по измеренным размерам капель и заданной начальной концентрации раствора.

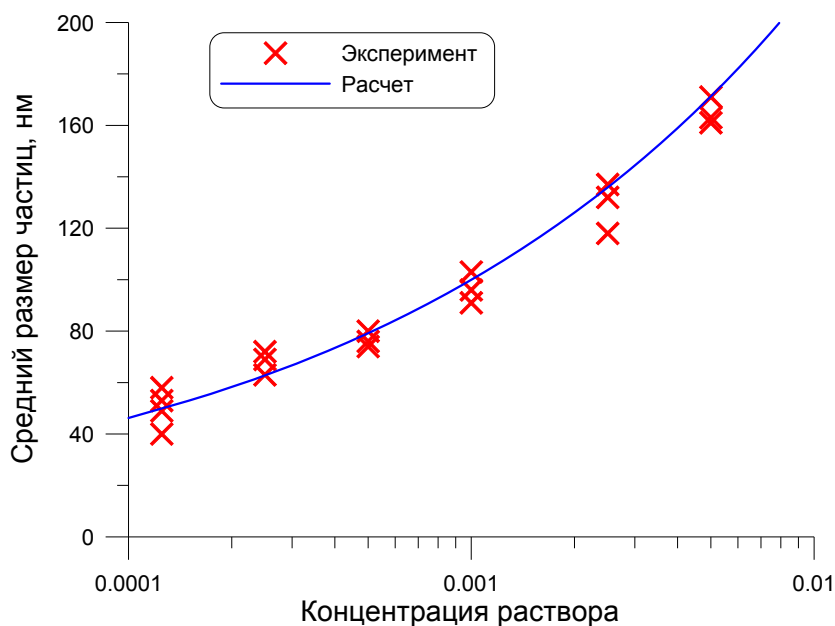


Рис. 2. Зависимость размера частиц от начальной концентрации раствора

Из рис. 2 видно, что уменьшение начальной концентрации нанообразующих веществ в растворе приводит к образованию более мелких частиц. Так, при изменении весовой концентрации водного раствора лозартана от 1/200 до 1/8000 средний размер образующихся сухих частиц изменяется от примерно 160 нм до 50 нм. Увеличение начальной концентрации смещает функцию распределения частиц по размерам в сторону более крупных частиц. На рис. 3 приведена функция распределения частиц лозартана, полученных путем испарения капель раствора. На этом рисунке сплошной линией показаны результаты измерений спектрометром аэрозольных частиц ДСА в области 3-200 нм, прерывистой линией – в оптической области (300-1000 нм). Средний диаметр полученных частиц составил около 50

нм. Эти результаты согласуются с полученными ранее по рассеянию Ми данными о среднем начальном размере капель распыляемого раствора порядка 1 мкм.

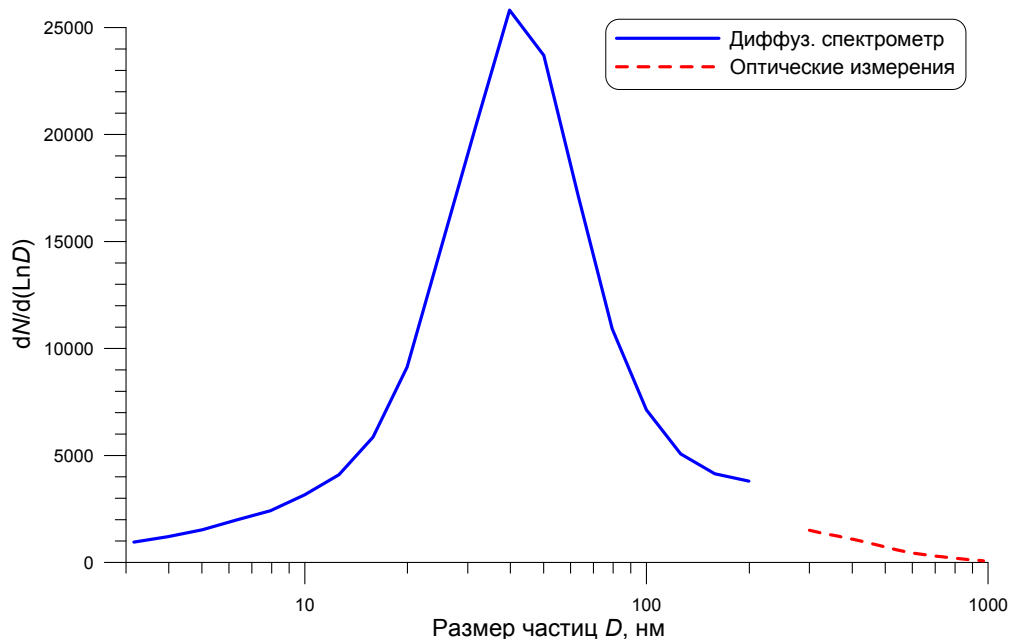


Рис. 3. Функция распределения частиц лозартана по размерам. Начальная концентрация раствора 1/4000

При этом суммарное количество распыленных капель во всех выбранных режимах меняется незначительно. Полученный результат является принципиально важным, так как экспериментально подтверждает предположение о возможности управления функцией распределения частиц по размерам изменением начальной концентрации нанообразующего вещества в растворе.

Для того чтобы отследить эволюцию частиц во времени были проведены измерения концентрации частиц и функций распределения частиц по размерам в рабочей камере в промежутках времени от 3 до 30 мин. от момента напуска. График изменения концентрации частиц во времени приведен на рис. 4.

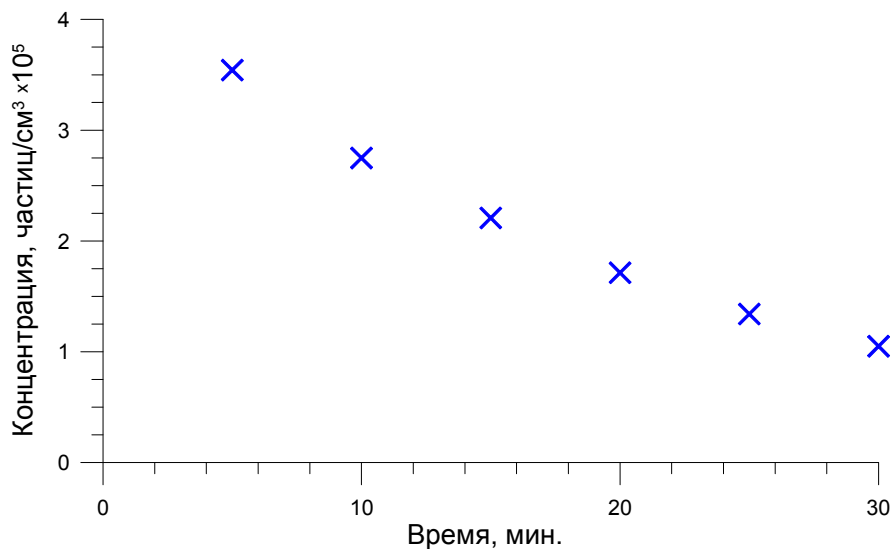


Рис. 4. Изменение концентрации частиц во времени

Что касается изменения во времени функции распределения частиц по размерам, эксперименты показали, что оно не является существенным. Сам по себе механизм изменения является довольно сложным – с одной стороны происходит коагуляция частиц,

сильно зависящая от концентрации и размеров частиц, с другой стороны происходит оседание частиц на стенках рабочей камеры, также зависящее от размеров частиц. В целом же по результатам измерений за 30 мин. наблюдается некоторый сдвиг функции распределения частиц по размерам в область более крупных частиц, но величина этого сдвига сравнима с погрешностью измерений.

Так как процесс испарения капель является быстрым (доли секунды для капель моноконцентрированных жидкостей микронного размера [2] и от долей секунды до нескольких секунд для капель многокомпонентных жидкостей), а скорость гравитационного осаждения сухих ультрадисперсных частиц мала (порядка 10^{-4} см/с для частиц размера 100 нм [3]), то по измеренной функции распределения сухих частиц по размерам и по заданной концентрации раствора можно восстановить функцию распределения по размерам капель в газокapельном потоке. Пример восстановленной функции распределения приведен на рис. 5.

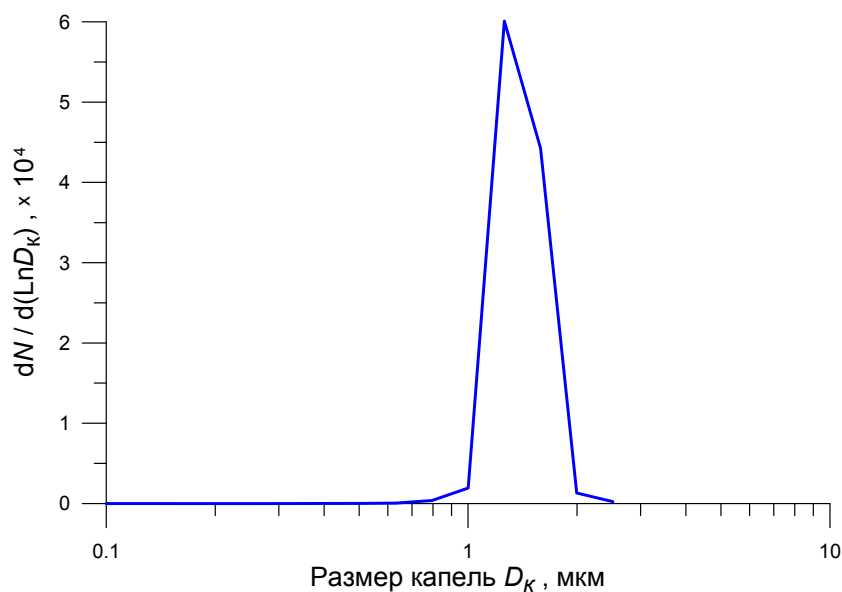


Рис. 5. Восстановленная функция распределения капель по размерам

Из рис. 5 видно, что размер капель в газокapельном потоке составляет 1-2 мкм. Эти данные хорошо согласуются с полученными по рассеянию Ми данными по среднему размеру капель в потоке. Таким образом, по результатам измерений среднего размера капель многокомпонентных жидкостей в газокapельном потоке можно определять средний размер образующихся в результате испарения капель сухих ультрадисперсных частиц, и, наоборот, по результатам измерения функции распределения сухих ультрадисперсных частиц можно восстанавливать функцию распределения капель в газокapельном потоке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы экспериментальная установка и комплекс аппаратуры для получения и исследования микрокапельных потоков.

С помощью методики лазерного светорассеяния на каплях измерены средние размеры капель многокомпонентных жидкостей в газокapельном потоке. С помощью диффузионного спектрометра измерены функции распределения сухих ультрадисперсных частиц, образующихся при испарении капель многокомпонентных жидкостей. Указанные методики являются независимыми, а их совместное использование повышает достоверность результатов исследований, а именно: измерения размеров капель позволяют определить ожидаемые размеры ультрадисперсных частиц, а из измерений размеров частиц можно определить начальные размеры капель.

Прослежена эволюция ультрадисперсных частиц в замкнутом объеме. Показано, что при уменьшении со временем концентрации частиц в объеме функция распределения частиц по размерам меняется незначительно, что является важным, в частности, для биомедицинских технологий, а именно при разработке новых форм лекарственных препаратов.

Показана возможность управления функцией распределения по размерам ультрадисперсных частиц, образующихся при испарении капель многокомпонентных жидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант МК-182.2010.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1961. – 536 с.
2. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. – М.: Изд. Ак. Наук СССР, 1958. – 89 с.
3. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 278 с.

I.V. Yarygin ¹, M.N. Andreev ², Yu.N. Vyazov ³

¹ Kutateladze Institute of thermophysics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

² Novosibirsk State University, Russia,
630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2

³ Novosibirsk State Technical University, Russia,
630092, Novosibirsk, K.Marx ave., 20

DIAGNOSTICS OF MICRO-DROPLET FLOWS AND ULTRA DISPERSE PARTICLES FORMED FROM THEM

Possibilities and restrictions of both optical and non optical methods of droplet phase diagnostics in gas-droplet flows are discussed in the report. It is shown that distribution functions of droplets and their mean diameter can be obtained with the help of measurements of ultra disperse particles, formed from micro-droplet flows after droplets evaporation. Examples of producing and research of gas-droplet flow for space and biomedical applications are given.

GAS-DROPLET FLOW, ULTRA DISPERSE PARTICLES, MEASUREMENT TECHNIQUES