



УДК 621.165.51

Л.А. Фельдберг<sup>1</sup>, Н.В. Семидетнов<sup>2</sup>, А.В. Терентьев<sup>1</sup>, А.Р. Шустер

<sup>1</sup> ООО «АЛЬСТОМ Энергетические Турбомашины», Санкт-Петербург, Россия, 191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/б, E-mail: feldberg@tanja.spb.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3, E-mail: n.semidetnov@ans.spb.ru

## **ИЗМЕРЕНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ПОТОКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТУРБИНЕ**

### **АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена применению метода спектрального ослабления для измерения закона распределения по размерам капель воды во влажнопаровом потоке. Получено точное решение некорректной обратной задачи относительно закона распределения капель по размерам. Представлен математический аппарат и приведены результаты математического моделирования измерений и обработки реальных данных ослабления. Разработан измерительный комплекс для реализации предложенной методики.

ДИСПЕРСНОСТЬ, ИЗМЕРЕНИЕ, СПЕКТРАЛЬНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

### **ВВЕДЕНИЕ**

Задача повышения эффективности и надежности паровых турбин неизбежно приводит к необходимости детального исследования фракционного состава потока влажного пара в ступенях, работающих в зоне конденсации. Речь идет об измерении размеров капель в диапазоне 0,05 – 2 мкм при их объемной концентрации  $10^{-5}$  –  $10^{-7}$ . Среди известных методов измерения оптические методы привлекают внимание в связи с возможностью создания на их базе компактных измерительных устройств, позволяющих проводить мало-возмущающие и безынерционные измерения с высокой потенциальной точностью. Из оптических методов наибольшее распространение при измерении влажности пара в проточной части экспериментальных и натуральных турбин получил метод спектрального ослабления излучения. Разработанная нами ранее методика и аппаратура позволяют измерить средний размер и концентрацию капель на основании ослабления излучения двух длин волн (при задании вида распределения капель по размерам) [1]. Позднее было получено точное решение для определения третьего момента распределения (объемной концентрации) и показано, что в принципе, для этого достаточно измерить ослабление излучения для трех длин волн [2]. Однако эти методы не способны определить вид функции распределения. В то же время знание вида закона распределения капель по размерам имеет большое значение для понимания физики процессов конденсации в высокоскоростных потоках пара.

Как известно, для определения искомого распределения по размерам требуется решить обратную некорректную задачу. До настоящего времени, к сожалению, не существует общепризнанного метода решения этой задачи [3]. Работы большого числа авторов привели в последнее время к появлению нескольких новых алгоритмов и вариаций известных алгоритмов. Все они в той или иной степени базируются на методе регуляризации с

различного вида ограничениями и в силу этого являются приближенными. В то же время возможно точное решение обратной задачи спектрального ослабления.

## ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ

В основе метода спектрального ослабления лежит закон Бугера-Ламберта-Бера. Согласно этому закону на трассе, проходящей через рассеивающую среду, сила света уменьшается пропорционально расстоянию и соответствующее отношение интенсивностей можно выразить соотношением:

$$I / I_0 = \exp\left\{-\pi L \int_0^{\infty} K(\rho) N(r) r^2 dr\right\}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус частицы,  $L$  – длина трассы,  $N(r) = CP(r)$  – закон распределения частиц по радиусам ( $C$  – счетная концентрация частиц,  $P(r)$  – плотность вероятности распределения по размерам), а  $K(\rho)$  – фактор эффективности ослабления. Фактор эффективности в общем случае определяется как поглощением излучения при распространении через материал частицы, так и рассеянием света на ней. Однако, в диапазоне длин волн  $0.2 \div 1.0$  мкм поглощение мало и им обычно пренебрегают [3].

Введем обозначение  $G(s) = \ln(I_0/I) / \pi L$ . Примем  $g(s) = G(s) / s^2$  и  $k(\rho) = K(\rho) / \rho^2$ . Тогда уравнение (1) примет вид

$$g(s) = \int_0^{\infty} k(\rho) N(r) r^4 dr. \quad (2)$$

Умножим уравнение (2) на  $s^{it}$ , где  $(-\infty < t < \infty)$

$$g(s) s^{it} = \int_0^{\infty} k(\rho) \rho^{it} N(r) r^{4-it} dr. \quad (3)$$

и проинтегрируем обе части (3) по  $s$

$$A(t) = \int_0^{\infty} g(s) s^{it} ds = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} k(\rho) \rho^{it} N(r) r^{4-it} dr ds. \quad (4)$$

Введем в (4) следующее обозначение

$$B(t) = \int_0^{\infty} k(\rho) \rho^{it} d\rho. \quad (5)$$

Теперь комбинируя (4) и (5) получим

$$A(t) = B(t) \int_0^{\infty} N(r) r^{3-it} dr. \quad (6)$$

Выполним замену переменной  $r=e^p$ . Тогда имеем

$$\int_{-\infty}^{\infty} N(e^p) e^{4p} e^{-itp} dp = A(t) / B(t). \quad (7)$$

Из (7), используя обратное преобразование Фурье, запишем

$$N(e^p) e^{4p} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(t) / B(t) e^{itp} dt = f(p). \quad (8)$$

Из уравнение (8) окончательно дает распределение частиц по размерам в виде

$$N(r) = f(\ln p) / r^4. \quad (9)$$

На базе описанного алгоритма разработана программа обработки результатов измерений [4]. Исходными данными для расчета является измеренная спектральная прозрачности двухфазной среды. Выходной файл содержит искомым закон распределения капель по радиусу, а также результат решения прямой задачи ослабления света с использованием полученного распределения. Кроме того, выдаются интегральные характеристики: заутеровский радиус и объемная концентрация влаги, а также количественные критерии достоверности решения задачи. Проведен большой объем тестовых численных экспериментов, который позволил оценить влияние на точность решения обратной задачи таких факторов, как спектральный диапазон измерений, вид спектра распределения (одномодальный, бимодальный), аппаратурный шум и ряда других.

## АППАРАТУРНОЕ РЕШЕНИЕ

Для технической реализации описанной методики создан измерительный комплекс, основными элементами которого являются оптический зонд и оптоэлектронная система. Оптический зонд не отличается от описанного в работе [1]. Оптоэлектронная система претерпела существенные изменения. В качестве источника света используется комбинированный источник света фирмы Ocean Optics (модель DH-2000). Излучение в УФ области обеспечивается дейтериевой газоразрядной лампой, а в видимой и ИК области – галогенной, интенсивность излучения которой можно регулировать.

Приемником излучения является компактный высокочувствительный спектрограф с охлаждаемой матрицей (модель QE65000 той же фирмы). Следует отметить повышенную чувствительность данной модели спектрографа в области жёсткого ультрафиолета. Для разрабатываемой системы первостепенное значение имеет спектральный диапазон измерений. Он определяется спектром источника света, спектральной чувствительностью приемника излучения и спектральным пропусканием оптических элементов зонда. Выбранный источник света обеспечивает непрерывный спектр излучения от 200 до 1000нм. Спектрограф имеет такую же область спектральной чувствительности. Ограничивает спектральный диапазон измерений оптическая система зонда, состоящая из световодов, линзы и призмы. Результирующий спектральный диапазон измерительного комплекса 230 – 900 нм.

Описанный измерительный комплекс использовался для проведения измерений на экспериментальной паровой турбине. Полученные экспериментальные данные

обрабатывались с помощью разработанной программы. Кроме того, программа использовалась для обработки экспериментальных данных, полученных предыдущим поколением измерительного комплекса [2], который позволяет получить данные об ослаблении среды в том же диапазоне, но для ограниченного количества длин волн (от семи до десяти). В обоих случаях программа показала хорошую сходимость результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый аналитический метод решения обратной задачи светорассеяния в области частиц соизмеримых с длиной волны рассеиваемого излучения. Разработана программа, реализующая предложенный метод. Программа прошла апробацию при обработке результатов измерений. Разработана и изготовлена оптоэлектронная система позволяющая измерить ослабление света влажнопаровым потоком в экспериментальной турбине в широком диапазоне длин волн (от 230 до 900нм). Разработанная программа вводится в практику штатного эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фельдберг Л.А.** Дисперсный анализ двухфазных потоков в паровых турбинах, Труды ЦКТИ, вып. 292, 2003г.
2. **Терентьев А.В., Фельдберг Л.А., Шустер А.Р.** Измерение объемной концентрации диспергированной фазы методом спектральной прозрачности // В сб. «Оптические методы исследований потоков»: Труды VIII международной научно-технической конференции / под ред. Ю.Н. Дубнищева, Б.С. Ринкевичюса.- М.: Издательство МЭИ, 2005. С.37
3. **Riefler, N., T. Wriedt** Intercomparison of Inversion Algorithms for Particle-Sizing Using Mie Scattering." Particle & Particle Systems Characterization 25(3), 2008. P.216-230.
4. **Семидетнов Н.В.** Решение обратной задачи спектрального ослабления методом приведения к интегралу Фурье: ограничения и погрешности // Публикуется в настоящем сборнике.

L.A. Feldberg<sup>1</sup>, N.V. Semidetnov<sup>2</sup>, A.V. Terentjev<sup>1</sup>, A.R. Shuster

<sup>1</sup> LLC «ALSTOM Energeticheskie turbomashiny», Saint-Petersburg, Russia,  
191167, Saint-Petersburg, ul. Atamanskaja, 3/6, E-mail: feldberg@tanja.spb.ru

<sup>2</sup> Saint-Petersburg State Marine Technical University, Russia,  
190008, Saint-Petersburg, ul. Lotsmanskaja, 3, E-mail: n.semidetnov@ans.spb.ru

## DROPLET SIZE MEASUREMENT FOR INITIAL CONDENSATION IN A MODEL TURBINE

*The work focuses on the application of the light extinction method for measuring wetness and droplet size distribution in wet steam model turbine. Exact solution of ill-posed inverse problem with respect to the law of droplet distribution received. Special system, which measures the attenuation of the radiation in a wide range of wavelengths (from 230 to 900 nm) has been developed. The results of mathematical modeling of measurements and processing of real extinction data are presented.*

DISPERSITY, MEASUREMENT, SPECTRAL EXTINCTION, INVERSE PROBLEM