



УДК 621.165.51

Н.Ю. Бокучава¹, А.В. Терентьев², Л.А.Фельдберг³

¹ООО «АЛЬСТОМ Энергетические Турбомашины», Россия,
191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская 3/6, E-mail:
natalia.bokuchava@power.alstom.com

²ООО «АЛЬСТОМ Энергетические Турбомашины», Россия,
191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская 3/6, E-mail:
alexey.terentiev@power.alstom.com

³ООО «АЛЬСТОМ Энергетические Турбомашины», Россия,
191167, Санкт-Петербург, ул. Атаманская 3/6, E-mail: feldberg@tanja.spb.ru

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ КОНДЕНСИРУЮЩЕГОСЯ ПАРА

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена сравнительному анализу трех методов решения обратной задачи светорассеяния. Представлены результаты численного эксперимента по оценке точности различных методов. Рассмотрено влияние дисперсии показателя преломления рассеивающих частиц на точность измерений. Проведена оценка влияния многократного светорассеяния на границы применения закона Бугера.

СПЕКТРАЛЬНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ, ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА, ТОЧНОСТЬ, ДИСПЕРСИЯ, МНОГОКРАТНОЕ СВЕТОРАССЕЙЯНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Доклад посвящен анализу методов фракционного анализа газокапельных потоков с оптически прозрачными частицами соизмеримыми с длиной волны света. Объект исследования - высокоскоростные паровые потоки, в которых происходит спонтанная конденсация. Радиус образующихся капель от 0,05 до 1 мкм, объемная концентрация меняется в пределах от $C_v=10^{-7}$ до $C_v=10^{-5}$. Наиболее эффективным методом фракционного анализа подобных тонкодисперсных газокапельных аэрозолей является метод спектральной прозрачности, базирующийся на законе Бугера.

$$I(r, \lambda) = I_0 \cdot \exp\left(-\int \pi \cdot L \cdot K(\rho) \cdot r^2 \cdot N(r) \cdot dr\right), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего на двухфазную среду излучения с длиной волны λ ,

I – интенсивность ослабленного средой излучения,

L – база просвечивания,

$N(r)$ – закон распределения капель по размерам,

$K(\rho)$ – коэффициент ослабления света отдельной каплей,

$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{\lambda}$ – параметр дифракции (критерий подобия для эффектов рассеяния света).

В предыдущих работах были предложены три метода решения уравнения (1): метод двух длин волн [1], интегральный метод [2] и метод приведения к интегралу Фурье [3, 4].

Метод двух длин волн – упрощенный, но достаточно эффективный метод фракционного анализа. Было показано, что отношение логарифмов ослабления излучения на двух длинах волн в некотором диапазоне размеров является монотонной функцией заутеровского размера капель r_{32} . На основании полученного таким образом радиуса r_{32} определяется объемная концентрация C_v . Метод прост в технической реализации, и единственным его недостатком является то, что при расчете необходимо задавать вид закона распределения капель по размерам.

Интегральный метод основан на точном решении уравнения (1) относительно третьего момента распределения (пропорционального C_v) и требует измерения спектральной прозрачности среды в максимально возможном широком спектральном диапазоне.

Метод приведения к интегралу Фурье – также основан на точном решении уравнения (1) и, в отличие от других методов, позволяет определить закон распределения капель по размерам.

Хотя описанные выше методы представляют собой точные решения уравнения (1) (кроме метода двух длин волн), каждый из них имеет свою погрешность определения необходимых параметров. Прежде всего это связано с техническим ограничением спектрального диапазона, в котором проводятся измерения прозрачности. На границах диапазона измерений возникает погрешность, связанная с характером зависимости коэффициента $K(\rho)$, определяющего процесс ослабления света. Со стороны мелких капель ($\rho < 1$) находится область релеевского рассеяния, в которой данные спектральной прозрачности, в принципе, не несут информации о размерах капель. Аналогичная ситуация наблюдается и со стороны крупных капель ($\rho \gg 1$), для которых данные спектральной прозрачности также не несут информации о размерах капель.

Представляет интерес сравнить точность и диапазон применимости трех рассматриваемых методов.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для этой цели была проведена серия численных экспериментов, схема которых приведена на рис. 1.

Все три метода реализованы в соответствующих программах обработки, в которых в качестве исходных данных используются данные ослабления излучения: в методе двух длин волн – на двух длинах волн (в синей и красной области спектра), а в двух других методах – 1000 значениях в широкой спектральной области.

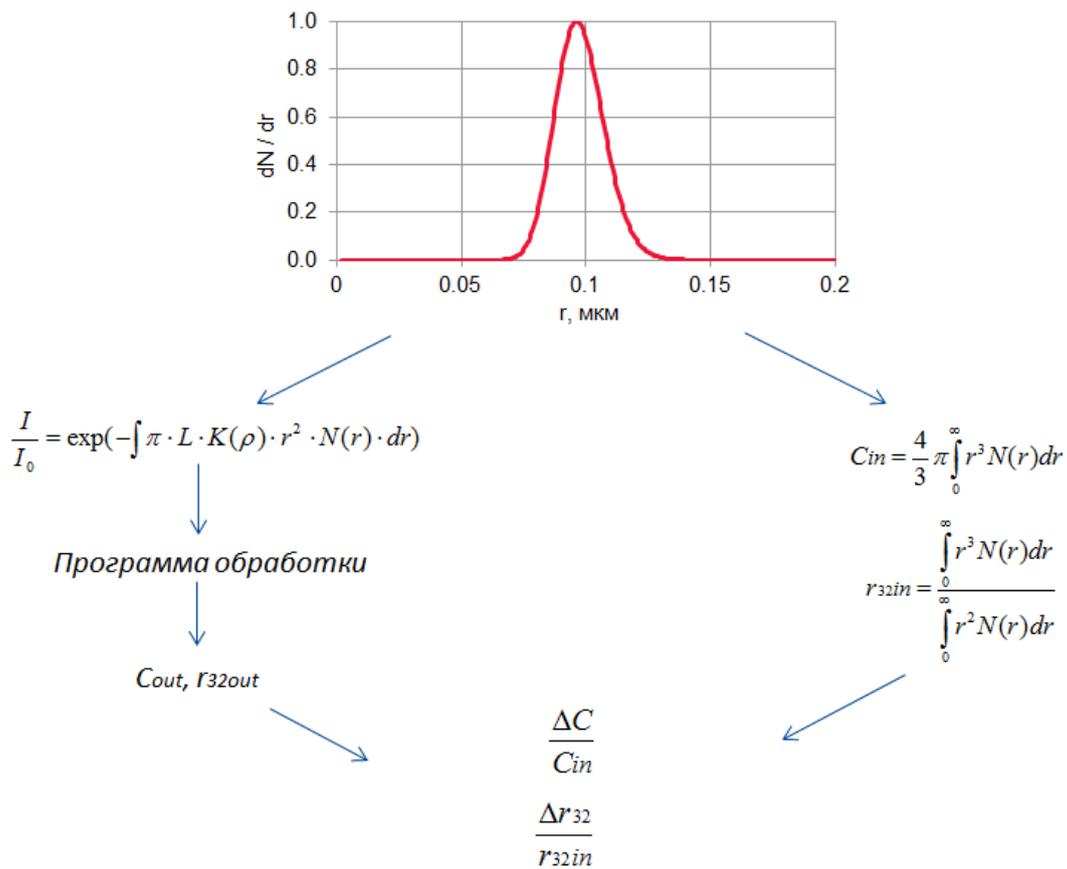
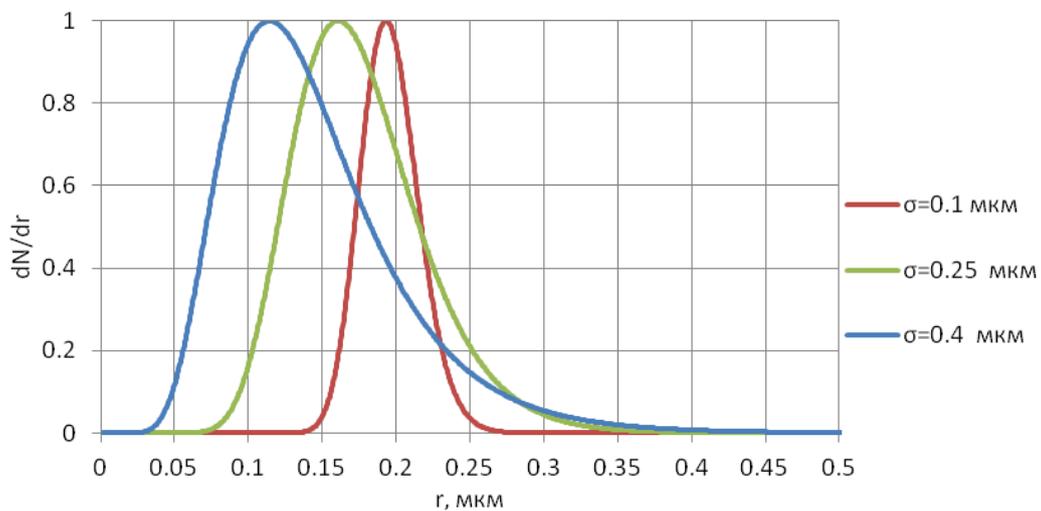


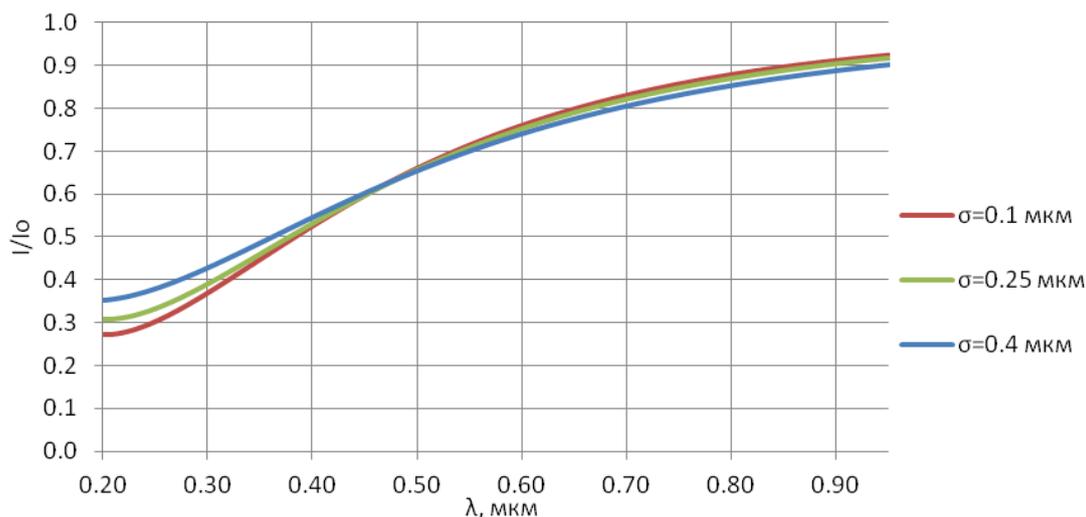
Рис.1. Схема численного эксперимента по сравнению методов решения обратной задачи светорассеяния (индекс 'in' соответствует параметрам, задаваемым в программе обработки спектров ослабления, 'out' – параметрам, полученным в результате обработки спектров выбранными методами)

Для логнормальных распределений каплей по размерам (с заутеровским размером r_{32} равным 0,1; 0,2; 0,4 и 0,6 мкм при полуширине спектра распределения каплей по размерам $\sigma=0,1; 0,25$ и $0,4$ мкм) решением прямой задачи светорассеяния рассчитывались зависимости ослабления света от длины волны.

На рис. 2, а в качестве иллюстрации приведены распределения каплей по размерам для $r_{32}=0,2$ мкм при трех значениях σ . Соответствующие им спектры ослабления излучения для объемной концентрации $C_v = 2 \cdot 10^{-6}$ на базе просвечивания $L = 45$ мм представлены на рис. 2, б.



а) распределения каплей по размерам



б) спектры ослабления излучения

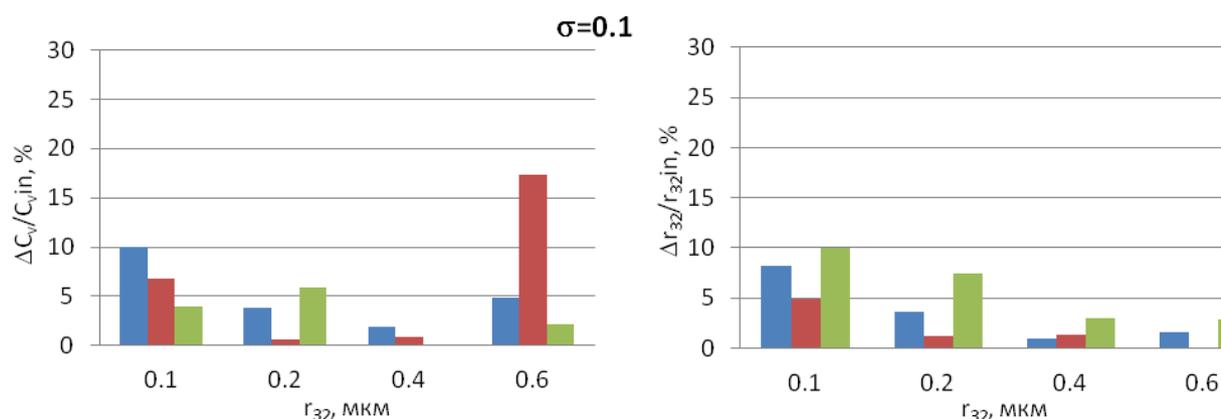
Рис.2. Исходные данные для тестирования программ ($r_{32}=0,2$ мкм, $C_v=2 \cdot 10^{-6}$, $L=45$ мм)

Эти данные являются исходными для трех тестируемых программ. Параметры, по которым оценивались выбранные методы, были следующие: воспроизводимость среднего радиуса r_{32} и объемной концентрации C_v , а также восстановление закона распределения капель по размерам для метода приведения к интегралу Фурье. В качестве численной оценки использовались относительные отклонения указанных величин (%):

$$\Delta r_{32} = \frac{(r_{32 \text{ out}} - r_{32 \text{ in}}) \cdot 100}{r_{32 \text{ in}}}$$

$$\Delta C_v = \frac{(C_{v \text{ out}} - C_{v \text{ in}}) \cdot 100}{C_{v \text{ in}}}$$

Результаты сравнительного анализа трех рассматриваемых методов для различных законов распределения капель по размерам приведены на рис. 3.



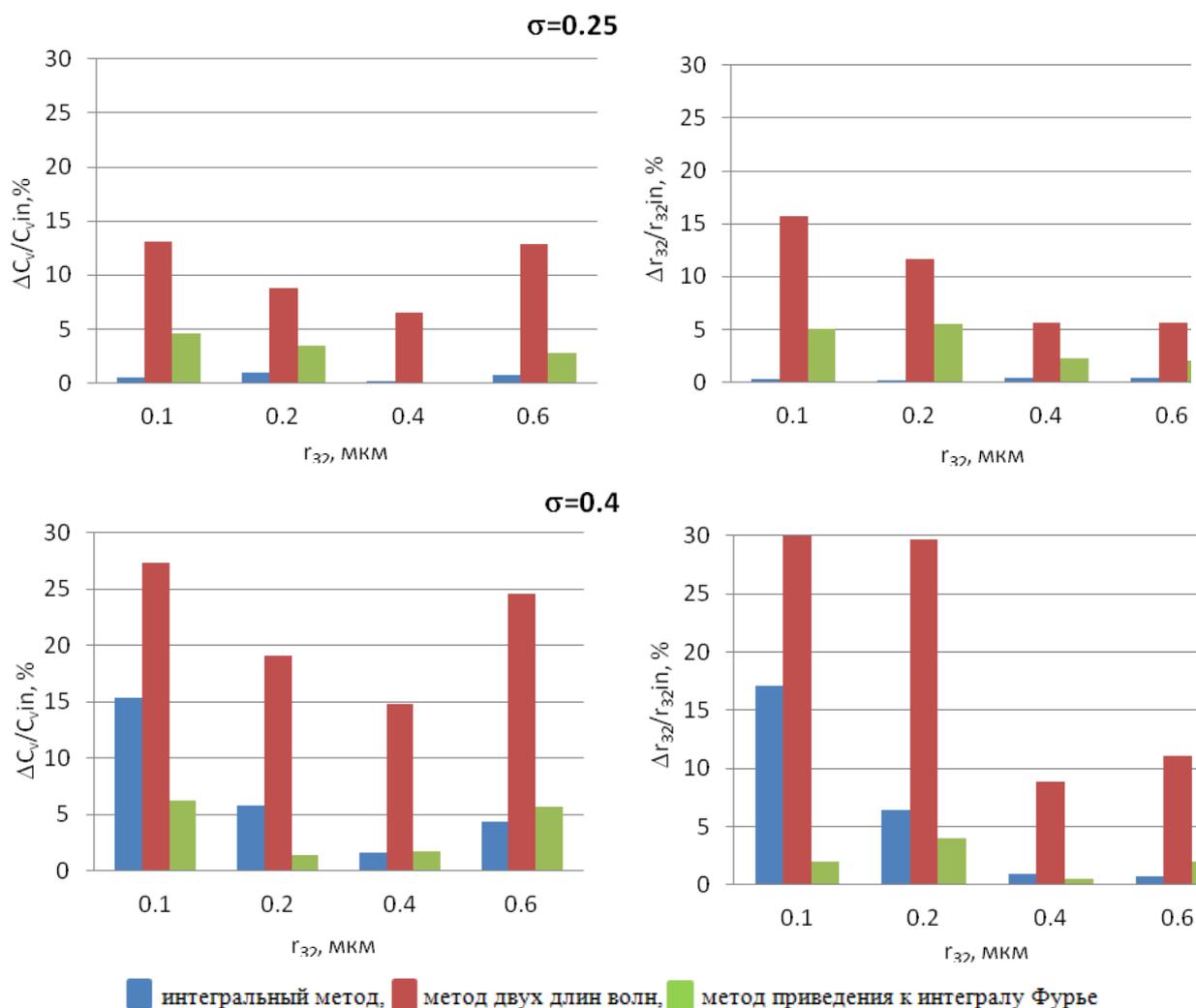


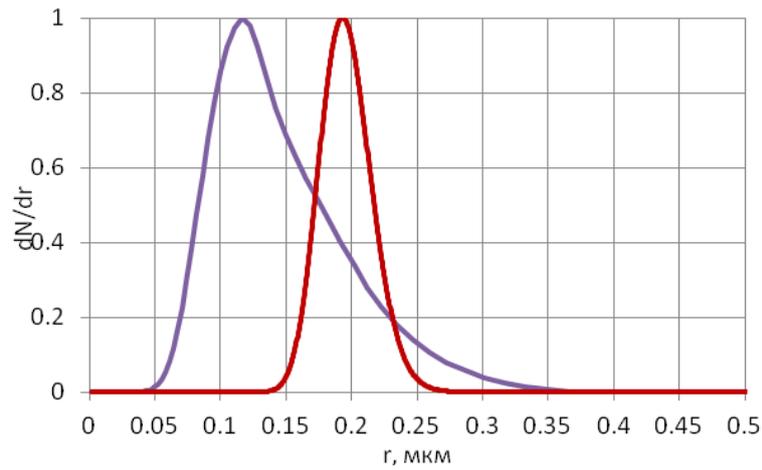
Рис.3. Сопоставление погрешности измерений концентрации и размера капель различными методами

Представленные зависимости относительной погрешности определения размера и объемной концентрации для трех значений σ показывают, что рассматриваемые методы имеют пик чувствительности в разных областях. Так, интегральный метод показал наименьшие отклонения для спектров с полушириной 0,25 мкм. В целом данный метод показывает хорошие результаты для капель размером больше 0,1 мкм, при этом в некоторых случаях отклонения близки к нулю.

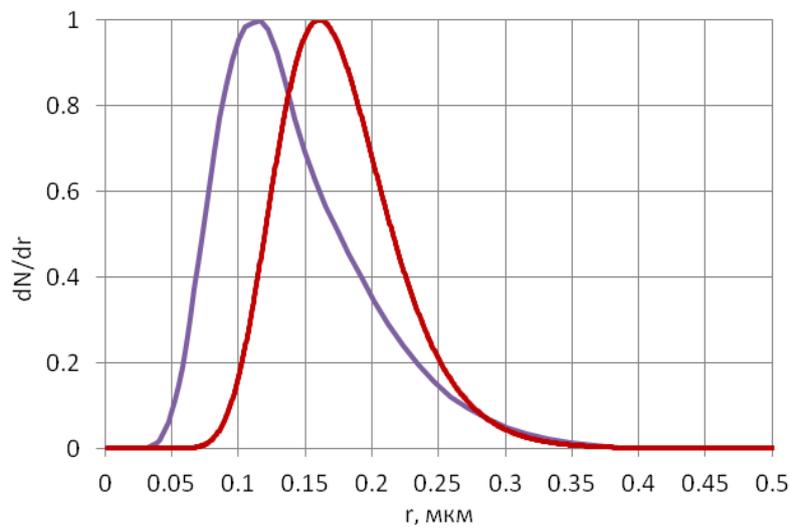
Метод двух длин волн лучше работает в области узких спектров распределения и средних размеров (0,2 – 0,4 мкм). Однако, отклонения, полученные этим методом, в большинстве случаев превышают отклонения, полученные при использовании двух других методов.

Метод приведения к интегралу Фурье в основном дает отклонения не более 5%, в отдельных случаях показывая результаты, близкие к нулю, но для узких спектров и маленьких радиусах дает отклонения до 10% (при определении радиуса).

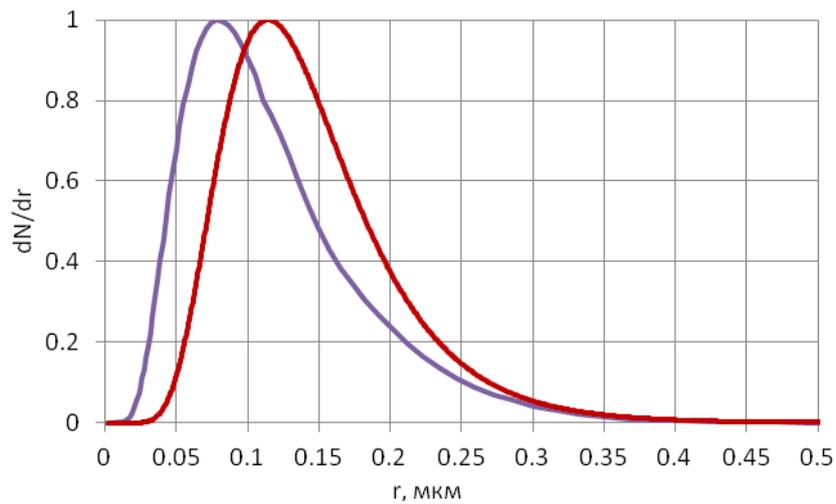
Метод приведения к интегралу Фурье кроме определения размера капель и их концентрации, позволяет восстановить распределения капель по размерам. На рис.4 показаны примеры восстановления спектров распределения для $r_{32} = 0,2$ мкм при трех значениях σ .



а) $\sigma = 0,1$ мкм



б) $\sigma = 0,25$ мкм



б) $\sigma = 0,4$ мкм

— исходный спектр, — восстановленный спектр

Рис.4. Пример восстановленных распределений капель по размерам

При восстановлении спектра распределения капель по размерам наблюдается завышение ширины спектра и смещение пика в сторону мелких капель.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

Приведенные выше оценки сделаны, как это обычно делается, в предположении постоянства показателя преломления рассеивающих частиц ($n = \text{const}$). В реальности у капель воды существует дисперсия показателя преломления. Из приведенной на рис. 5 кривой [5] видно, что в УФ диапазоне показатель преломления воды меняется весьма существенно: от 1,42 до 1,33.

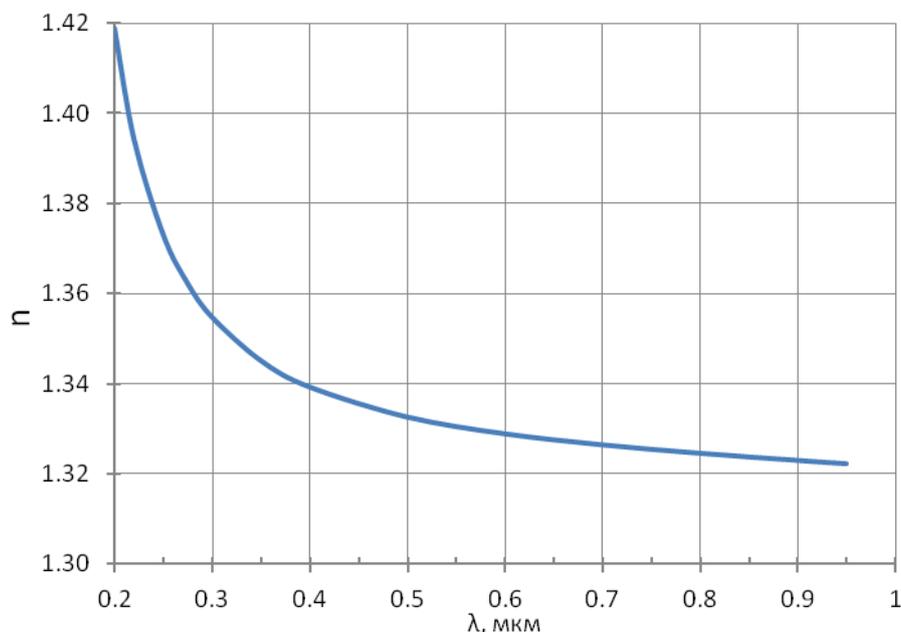


Рис. 5. Дисперсия показателя преломления воды

Это приводит к изменению характера коэффициента ослабления в законе Бугера. И если при условии $n = \text{const}$ коэффициент ослабления зависит только от параметра дифракции $K = K(\rho)$, то при $n = \text{var } K = K(\rho, \lambda)$, т.е. он зависит не только от данного параметра, но и от самой длины волны.

На рис. 6 в виде иллюстрации представлены спектры ослабления излучения каплями воды с представленным выше законом распределения по размерам ($C_v = 2 \cdot 10^{-6}$, $r_{32} = 0,1$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм, $L = 45$ мм), рассчитанные с учетом и без учета дисперсии показателя преломления.

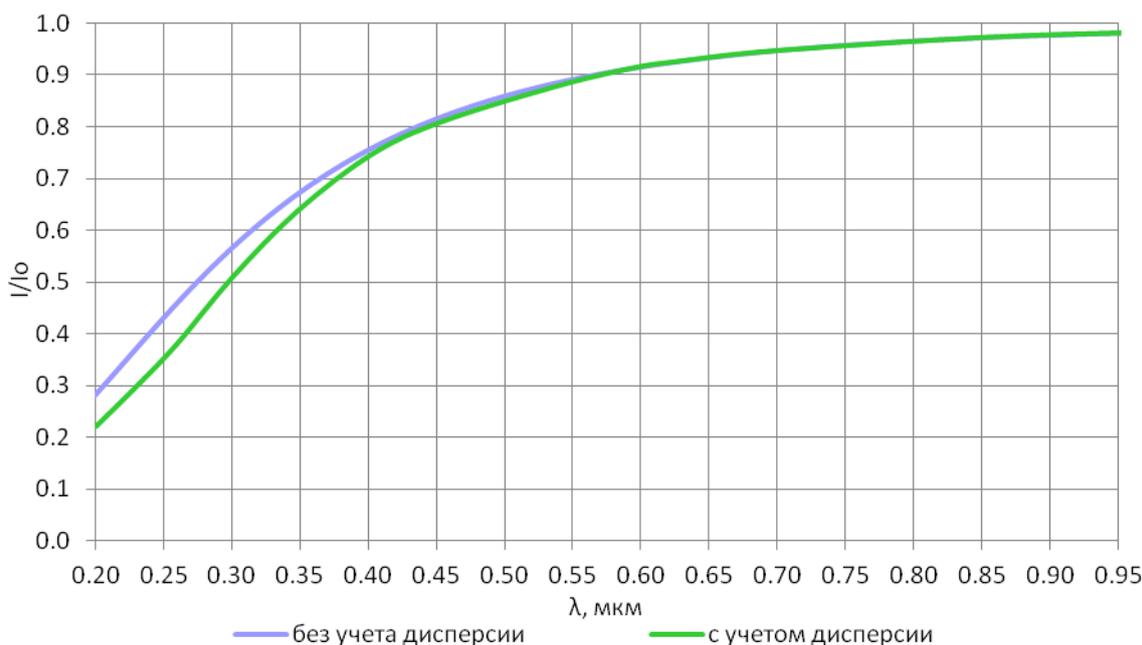
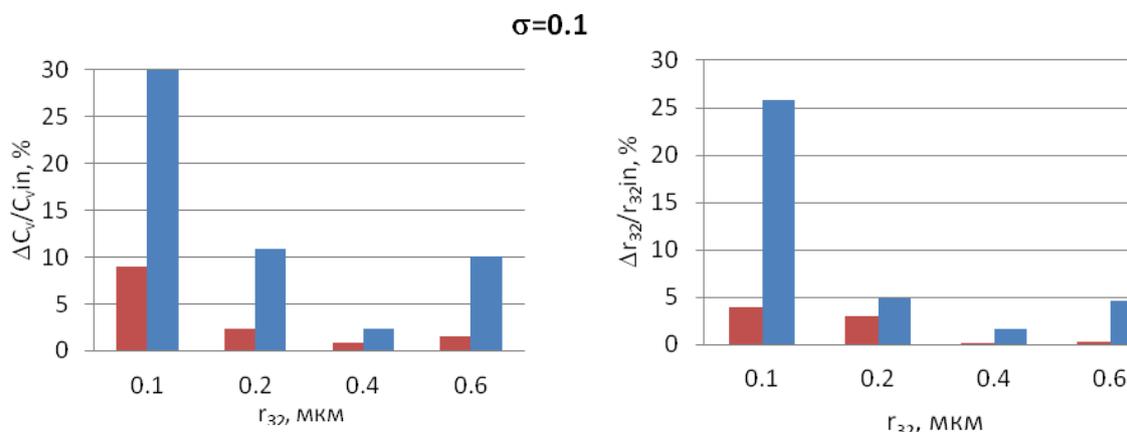


Рис.6. Влияние дисперсии показателя преломления на спектры ослабления излучения ($C_v = 2 \cdot 10^{-6}$, $r_{32} = 0,1$ мкм, $\sigma = 0,25$ мкм, $L = 45$ мм)

Видно, что наибольшее влияние дисперсии показателя преломления проявляется в коротковолновой области спектра. Именно эта область спектра важна при проведении измерений каплей $r_{32} < 0,2$ мкм. Для учета данного эффекта необходимо разрабатывать новые алгоритмы для каждого из трех рассмотренных выше методов решения уравнения (1). На данный момент реализован учет дисперсии показателя преломления только в программе обработки данных интегральным методом.

Для оценки влияния этого эффекта на погрешности измерения размера и концентрации каплей был проведен численный эксперимент, в ходе которого решалась прямая задача светорассеяния для спектров распределения каплей по размерам (при различной полуширине) с учетом дисперсии показателя преломления. Затем эти данные обрабатывались двумя программами, реализующими интегральный метод: с учетом и без учета дисперсии. Результаты представлены на рис. 7.



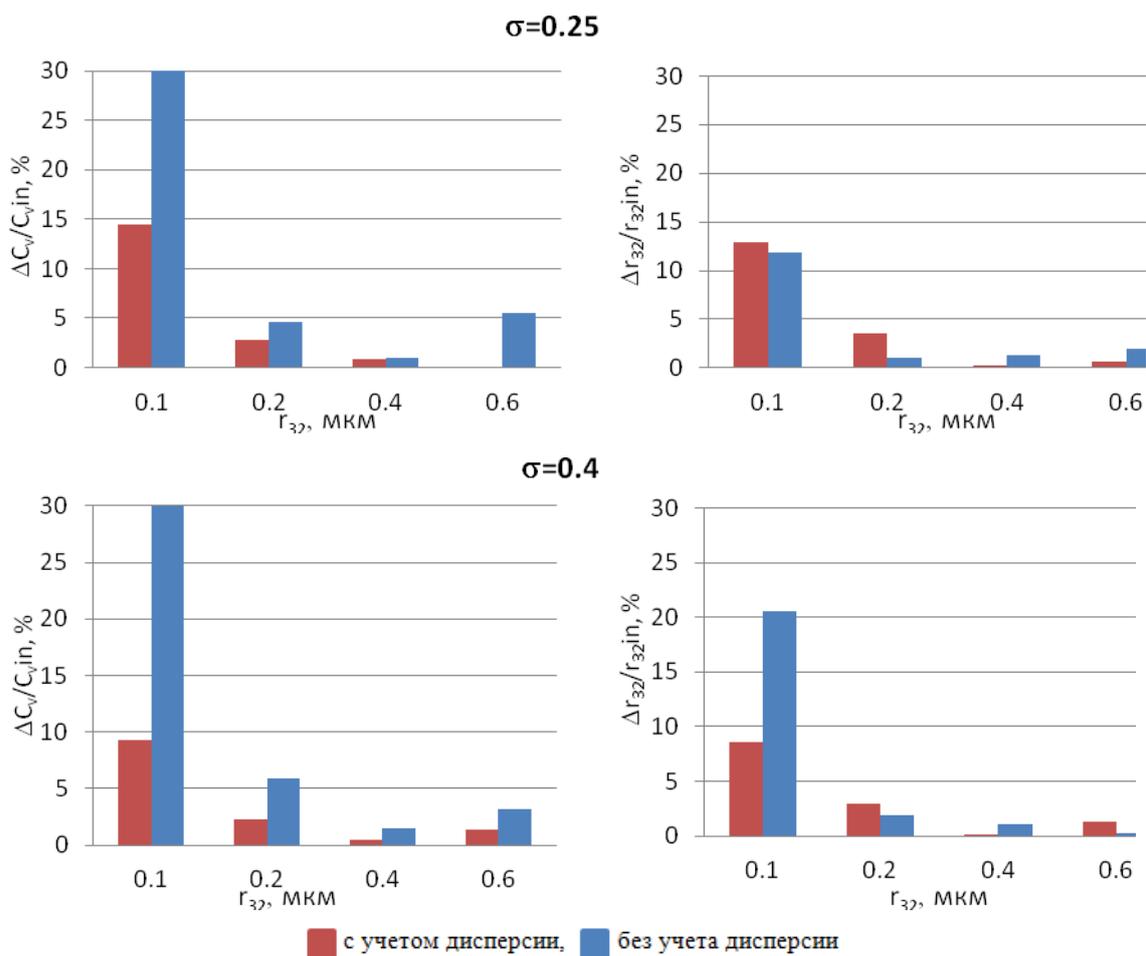


Рис.7. Результаты обработки спектров ослаблений интегральным методом с учетом и без учета дисперсии показателя преломления

Таким образом, при обработке измерений учет дисперсии показателя преломления воды позволяет существенно повысить точность измерения размера капель.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТА МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Все представленные в докладе расчеты основаны на эмпирическом законе Бугера (1), одним из условий применения которого является отсутствие многократного рассеяния света в исследуемой среде.

Параметром, характеризующим необходимость учета многократного рассеяния, является оптическая толщина:

$$\tau = \ln(I_0/I).$$

Общепринятых ограничений для оптической толщины в литературе нет. Согласно [6] при $\tau < 0,1$ влиянием многократного рассеяния можно пренебречь. Для случая, когда $0,1 < \tau < 0,3$ может быть необходима поправка на многократное рассеяние. Для $\tau > 0,3$ эффект многократного рассеяния оказывает существенное влияние на ослабление света.

Особенностью проводимых нами экспериментов является широкий диапазон изменений размера и концентрации капель в процессе измерений. При этом, как показывают оценки, в большинстве случаях $\tau \gg 0,3$.

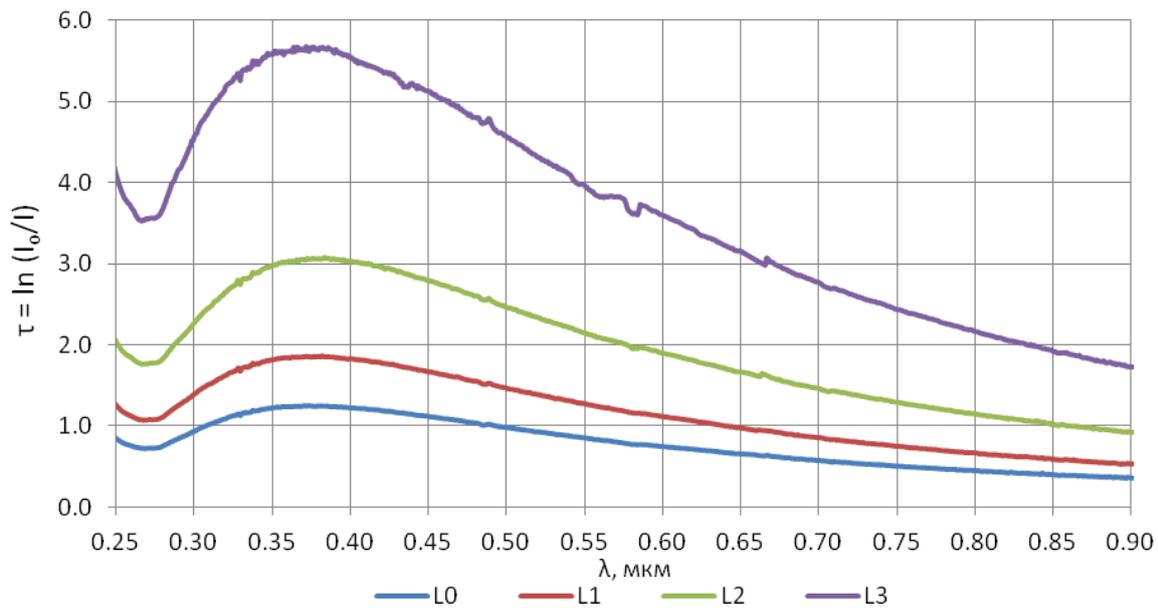
В связи с этим был поставлен модельный эксперимент по оценке допустимого значения оптической толщины применительно к условиям наших экспериментов. Суть эксперимента

состояла в следующем. Излучение широкополосного источника света (дейтериевая лампа DH2000 Ocean Optics) пропускалось через кварцевую кювету с модельным раствором, и ослабленное излучение регистрировалось спектрографом (QE65000 Ocean Optics). Модельный раствор представлял собой суспензию эталонных монодисперсных шариков полистирола в воде. Такой выбор материала частиц позволяет смоделировать капли воды в воздухе (паре), т.к. относительный показатель преломления полистирола в воде ($n = 1,59/1,33$) близок к показателю преломления воды в паре. Измерения проводились для значений концентрации и размеров частиц, соответствующим задачам нашего эксперимента ($C_v = 1,1 \cdot 10^{-5}$, $r = 0,4$ мкм). Измерения проводились при четырех значениях базы просвечивания (см. табл. 1).

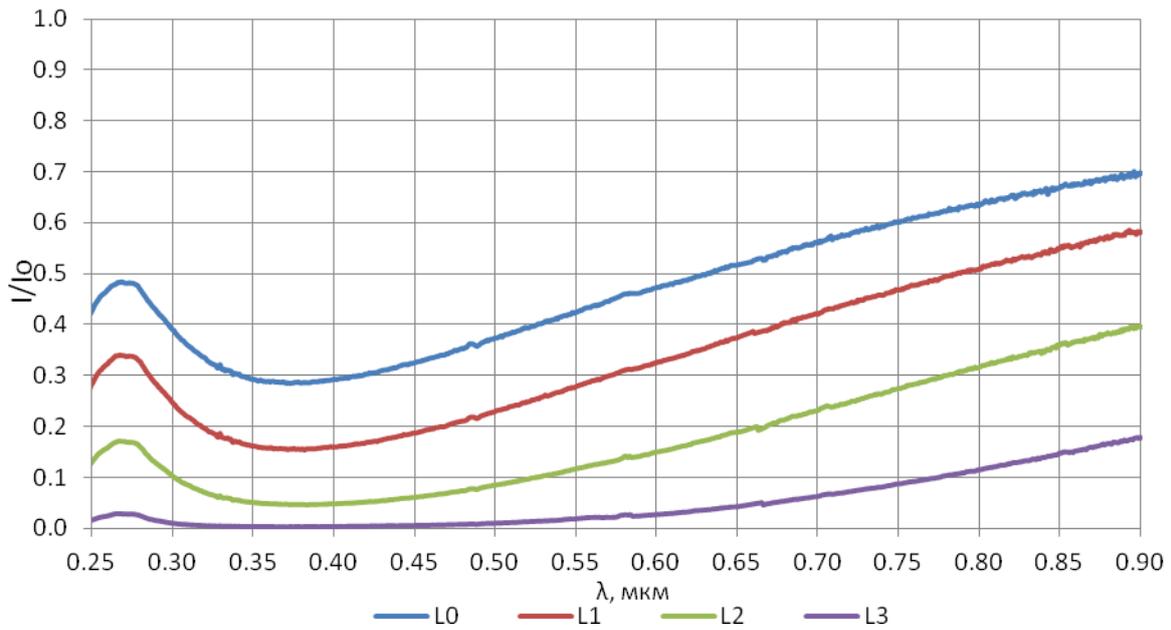
Таблица 1. Параметры эксперимента

База просвечивания L (длина кюветы), мм	Обозначение	Максимальная оптическая толщина τ_{max} ($\lambda=0.37$ мкм)	Максимальное ослабление света ($\lambda=0.37$ мкм), %	Относительная база просвечивания $Z=L/L_0$
20	L_0	1,25	71	$Z_0=1,0$
30	L_1	1,85	84	$Z_1=1,5$
50	L_2	3,05	95	$Z_2=2,5$
100	L_3	5,65	99	$Z_3=5,0$

Измеренные значения оптических толщин представлены на рис. 8, а, а соответствующие им величины ослабления света – на рис. 8, б.



а) зависимость оптической толщины от длины волны



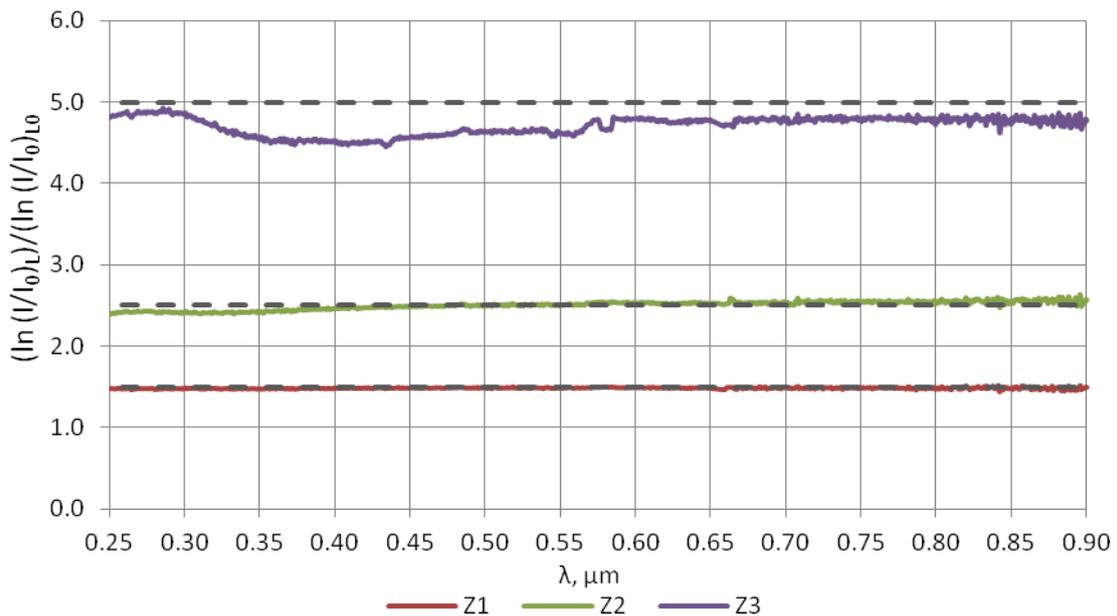
б) спектры ослабления излучения

Рис.8. Спектры ослабления излучения и оптическая толщина полистироловых частиц в воде ($C_v = 1.1 \cdot 10^{-5}$, $r = 0,4 \mu\text{м}$)

В качестве критерия наличия эффекта многократного рассеяния рассматривается соотношение ослабления света на разных базах просвечивания. Согласно (1) при отсутствии эффекта многократного рассеяния отношение логарифмов ослаблений излучения одной и той же средой на разных базах просвечивания должно быть равно отношению этих баз.

$$\frac{\ln_1 \left(\frac{I}{I_0} \right)}{\ln_2 \left(\frac{I}{I_0} \right)} = \frac{L_1}{L_2} = z \quad (2)$$

Полученные в результате эксперимента данные были преобразованы согласно (2) в отношения логарифмов ослаблений света. В качестве базового было выбрано ослабление, соответствующее кювете с наименьшим ослаблением света ($L_0 = 20 \text{ мм}$). Результаты преобразований представлены на рис. 9.



Здесь же пунктиром для разных баз просвечивания указаны теоретические значения Z , соответствующие условиям однократного рассеяния. Видно, что во всем спектральном диапазоне существенное отклонение от закона Бугера наблюдается только при базе просвечивания 100 мм и почти 100% ослаблении света.

Таким образом, в условиях, соответствующих условиям нашего эксперимента, даже при ослаблении света больше, чем на 90%, эффект многократного светорассеяния не оказывает существенного влияния на выполнение закона Бугера в широком спектральном диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ трех методов решения обратной задачи светорассеяния. Получена оценка точности всех методов. Проанализировано влияние дисперсии показателя преломления на решение обратной задачи интегральным методом и влияние многократного рассеяния на выполнение закона Бугера в широком спектральном диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добкес А.Л., Фельдберг Л.А.** Применение метода спектральной прозрачности для исследования дисперсной структуры влажно-паровых потоков. // Теплофизика высоких температур, том 18, № 3, 1980.
2. **Фельдберг Л.А., Терентьев А.В., Шустер А.Р.** Измерение объемной концентрации диспергированной фазы методом спектральной прозрачности. // Оптические методы исследований потоков: Труды VIII международной научно-технической конференции. М.: МЭИ, 2005. С. 37.
3. **Фельдберг Л.А., Семидетнов Н.В., Терентьев А.В., Шустер А.Р.** Измерение фракционного состава высокодисперсного газочапельного потока в экспериментальной турбине. // Оптические методы исследования потоков: Труды XII международной научно-технической конференции. М.: МЭИ, 2013.
4. **Семидетнов Н.В.** Решение обратной задачи спектрального ослабления методом приведения к интегралу Фурье: ограничения и погрешности. // Оптические методы исследования потоков: Труды XII международной научно-технической конференции. М.: МЭИ, 2013.
5. **George M. Hale, Marvin R. Querry.** Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region // Applied Optics Vol.12 No.3 March 1973.
6. **Г. ван де Хюлст.** Рассеяние света малыми частицами. // М.: Издательство иностранной литературы, 1961.

N.Y. Bokuchava¹, A.V. Terentjev², L.A. Feldberg³

¹LLC «ALSTOM Power turbomachines», Russia,
191167, Saint-Petersburg, Atamanskaja st., 3/6, E-mail:
natalia.bokuchava@power.alstom.com

²LLC «ALSTOM Power turbomachines», Russia,
191167, Saint-Petersburg, Atamanskaja st., 3/6, E-mail: alexey.terentjev@power.alstom.com

³LLC «ALSTOM Power turbomachines», Russia,
191167, Saint-Petersburg, Atamanskaja st., 3/6, E-mail: feldberg@tanja.spb.ru

SEVERAL METHODS OF THE INVERSE SOLUTION OF A LIGHT EXTINCTION SYSTEM OF EQUATION FOR THE INITIAL CONDENSATION IN FLOW

Comparative analysis of these three methods is presented in the paper. Numerical simulation for different types of droplet distribution is carried out. The methods' uncertainty is analyzed by a numerical experiment and the results are presented. Estimation of the integral method efficiency was made in terms of refractive index dispersion. Besides, validation test performed to evaluate the influence of the multiple scattering on the application of Bouguer law.

SPECTRAL EXTINCTION, INVERSE PROBLEM, ACCURACY, DISPERSION, MULTIPLE SCATTERING