

УДК 535.36

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ЭМУЛЬСИИ ВОДЫ В МАСЛЕ С ЦЕЛЮ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

© 2022 г. А. И. Пономарев<sup>1</sup>\*, О. А. Заякин<sup>2</sup>, С. П. Котова<sup>2</sup>,  
Н. Н. Лосевский<sup>2</sup>, Т. Н. Сапцина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева”, Самара, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самарский филиал, Самара, Россия

\*E-mail: andrey2000\_10@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Исследована зависимость рассеяния света на мелких каплях воды в несмешивающейся жидкости от угла наблюдения и количества воды для разработки датчика контроля количества воды в авиационном топливе. Работа направлена на поиск оптимального угла рассеяния для получения наибольшей чувствительности и монотонности сигнала в зависимости от количества воды.

DOI: 10.31857/S0367676522120249

### ВВЕДЕНИЕ

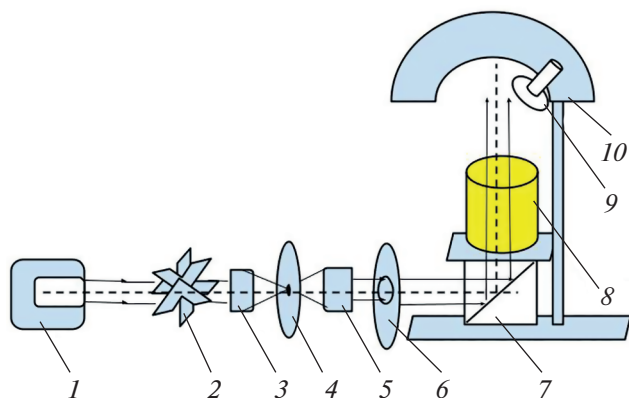
Актуальность работы обусловлена необходимостью тщательного контроля *in situ* количества воды в заправляемом в самолет авиационном топливе. Вода и авиационный керосин являются несмешиваемыми жидкостями, однако некоторое количество воды растворяется в керосине, поступая из окружающей атмосферы. Например, при 21°C и атмосферном давлении насыщенное топливо на основе керосина содержит приблизительно от 40 до 80 (вода) частей на миллион массовых долей (ppm) [1]. При этом вода не считается загрязняющим веществом, пока она находится в растворенном состоянии. Но при изменении внешних условий может произойти конденсация воды в капли, а также прямое попадание воды в топливо, например, конденсата со стенок резервуара, с последующим возможным образованием льда во время полета, что является опасным.

При заправке топлива в аэропортах осуществляется постоянный контроль содержания воды в топливе разными способами, в том числе и оптическими. Оптические методы контроля отличаются быстродействием и точностью, что позволяет использовать их в непрерывном режиме. Сконденсированная вода в керосине образует капли разного размера, на которых может происходить рассеяние света. Хотя допустимое значение содержания сконденсированной воды в керосине

достаточно низкое, порядка  $10^{-5}$  массовой доли, рассеяние на таких каплях можно зафиксировать. Существуют импортные датчики, основанные на этом принципе [2]. При этом у авторов нет информации относительно отечественных датчиков такого типа, что делает проблему более актуальной.

### РАССЕЯНИЕ СВЕТА НА МЕЛКИХ КАПЛЯХ ВОДЫ В НЕСМЕШИВАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Рассеяние света на различных объектах хорошо исследовано теоретически. В зависимости от размеров рассеивающего объекта применяются разные теории, в том числе теории Густава Ми и Джона Релея, дифракционный подход. Для частиц размером на порядок больше длины волны рассеивающегося света используется и геометро-оптический метод [3]. Экспериментальных работ для интересующего нас случая гораздо меньше, поэтому практическое исследование рассеяния на модельной среде, близкой по оптическим свойствам к авиационному топливу представляет определенный интерес. Из таких работ можно назвать количественный анализ концентрации жира и белка в молоке на основе опволоконной оценки интенсивности обратного рассеяния [4]. Однако в отличие от нашей задачи, здесь речь идет о мутной среде. У нас же среда является практически прозрачной, что, помимо каче-



**Рис. 1.** Схема установки: 1 – гелий-неоновый лазер (ГН-5П); 2 – прерыватель; 3 – фокусирующий объектив (фокусное расстояние  $F = 16$  мм, числовая апертура  $NA = 0.3$ ); 4 – пинхол (диаметр 0.05 мм); 5 – коллимирующий объектив (фокусное расстояние  $F = 33$  мм, числовая апертура  $NA = 0.11$ ); 6 – диафрагма (диаметр 2 мм); 7 – светоделительный кубик; 8 – кювета с исследуемой средой; 9 – фотодиодный датчик (ФД-24); 10 – поворотная подвижка.

ственных различий с упомянутыми работами, дает на несколько порядков меньший оптический сигнал.

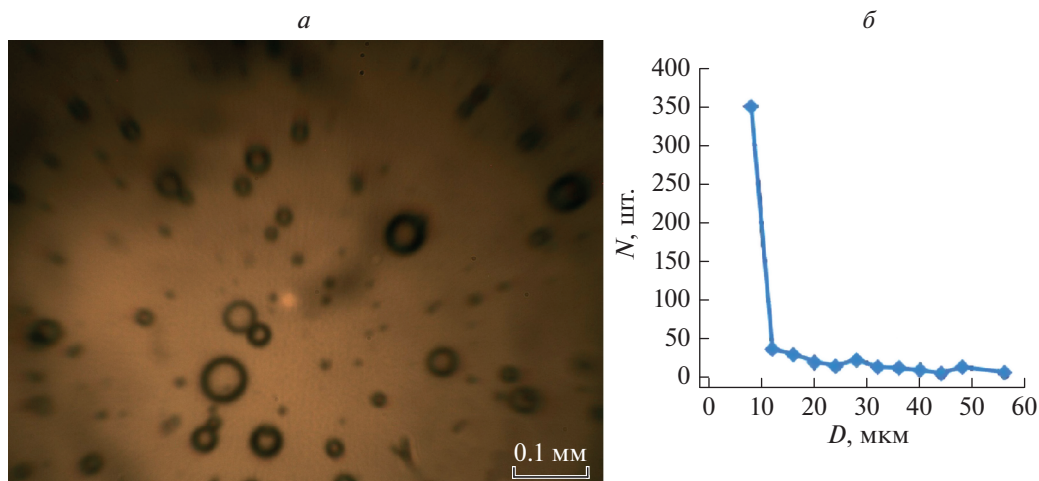
В качестве модельной среды для разработки датчика контроля количества воды в авиационном топливе было выбрано рафинированное подсолнечное масло с водой. Масло прозрачно и его показатель преломления близок к показателю преломления керосина (масло – 1.46, керосин – 1.39). Также на практике не трудно создать смеси с необходимым, очень низким содержанием воды. В работе исследовалась зависимость интенсивности рассеянного света от количества воды и

угла рассеяния. Целью работы было установление оптимального угла рассеяния и монотонности сигнала рассеяния в зависимости от количества воды.

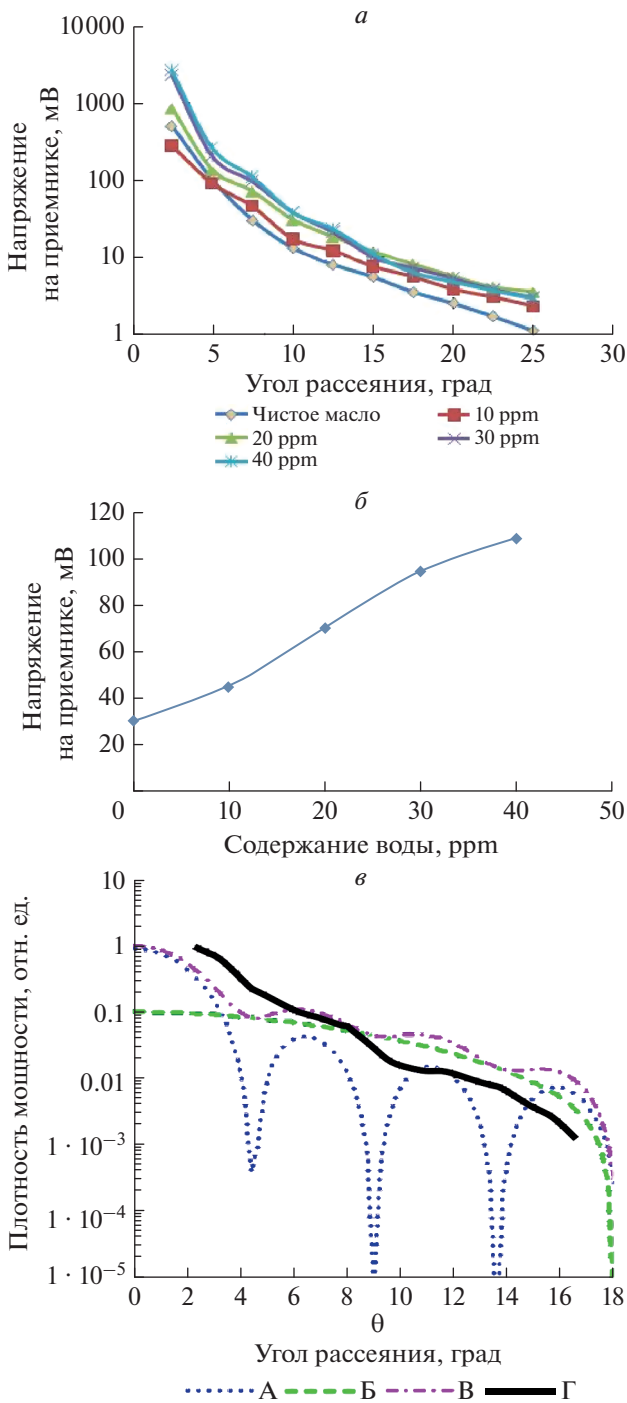
## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Массовая доля воды в масле варьировалась от  $10 \cdot 10^{-6}$  до  $40 \cdot 10^{-6}$ . Дробление капель производилось взбиванием бытовым миксером в течение пяти минут, с последующим отстаиванием в течение часа для освобождения смеси от пузырьков воздуха. Масло и вода для смеси отмерялись при помощи медицинских шприцов путем двух последовательных разведений. Определение размеров капель воды проводилось с использованием микроскопа ПоламЛ-213М и цифровой камеры ScorDEC DCM 300 с компьютерным интерфейсом USB 2.0.

Приготовленная среда помещалась в небольшой цилиндрический сосуд без дна, укрепленный на стеклянной подложке оптического качества. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Излучение заводилось через делительный кубик снизу. Источником света являлся гелий-неоновый лазер ГН-5П, мощностью 5 мВт. Мощность излучения, прошедшего через рассеивающую среду, вычислялась по сигналу с фотоприемного устройства на основе фотодиода ФД 24К [5] с чувствительностью 3.33 мкВт/В и равнялась 0.27 мВт. Излучение непрерывного лазера модулировалось частотой 170 Гц механическим прерывателем. Рассеянный свет регистрировался тем же измерителем на основе фотодиода ФД 24К, с временем срабатывания (постоянной времени)  $10^{-5}$  с и отклонением линейности, не превосходящим 2%, укрепленным на поворотной



**Рис. 2.** Статистика капель: вид капель под микроскопом (а); статистика распределения капель по размерам (б), где  $D$  – размер капли;  $N$  – количество частиц.



**Рис. 3.** Экспериментальные результаты: распределение интенсивности рассеянного света по углу для разной концентрации воды (*a*); зависимость интенсивности рассеянного света от концентрации воды при угле рассеяния  $7.5^\circ$  (*б*); сравнение расчетной зависимости интенсивности рассеянного света от угла с экспериментальными данными (*в*): А – дифракционная составляющая, Б – геометрическая составляющая, В – суммарная кривая, Г – экспериментальные результаты с массовой долей воды  $40 \cdot 10^{-6}$ .

оправе. Сигнал с фотоприемника подавался на селективный вольтметр В-6.9, в результате чего чувствительность увеличивалась еще в восемь раз, а быстродействие уменьшалось на два порядка.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Размеры капель определялись микроскопом и варьировались в интервале от 8 до 50 мкм. Вид капель в микроскопе и распределение капель по размерам, полученное в результате статистической обработки более 30 фотографий с камеры микроскопа со 160 кратным увеличением, приведены на рис. 2. Как и ожидалось, мелких капель (8 мкм) оказалось гораздо больше, чем крупных (больше 15 мкм). Далее в расчетах использовался размер капель, равный 8 мкм.

Экспериментальные результаты зависимости сигнала датчика, регистрирующего интенсивность рассеянного излучения в зависимости от содержания воды в масле, показаны на рис. 3. Видно, что при угле рассеяния  $7.5^\circ$  наблюдается монотонная зависимость сигнала приемника от концентрации воды в масле, что может позволить определять содержание воды по сигналу рассеяния. Следует отметить, что для углов рассеяния, меньших  $5^\circ$ , наблюдается немонотонная зависимость сигнала рассеяния от массовой доли воды в масле, что требует дальнейшего исследования.

Можно предположить, что вклад в рассеяние дает как дифракция, так и преломление [6]. Сравнение результатов расчетов, полученных на основе формул, приведенных в [6], с нашими экспериментальными результатами показало удовлетворительное качественное согласие (см. рис. 3в).

Полученные данные показывают, что сигнал приемника резко падает с характерными неоднородностями на несколько порядков при изменении угла рассеяния до  $20^\circ$ , что только и можно считать совпадением с расчетами. Так как условия эксперимента существенно отличаются от теоретических (близкое расположение фотоприемника по сравнению с протяженностью рассеивающей области), происходит усреднение по разным углам рассеяния и эти особенности гораздо слабее выражены. В доступных нам источниках конфигурация, соответствующая нашему эксперименту, не рассматривалась. Не анализировалась теоретически и схожая с нашей схема фирмы FAUDI [2], причем как самой фирмой, так и другими исследователями.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных экспериментальных результатов установлено, что при угле рассеяния  $7.5^\circ$  наблюдается монотонная зависимость сигнала приемника от количества воды, что подтвер-

ждает возможность разработки отечественного датчика контроля содержания свободной воды в несмешивающейся жидкости для достаточно низкой концентрации 10–40 ppm.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baena S., Repetto S.L., Lawson C.P. et al. // Prog. Aero-sp. Sci.* 2013. V. 60. P. 35.
2. [https://www.faudi-aviation.com/fileadmin/user\\_upload/BA\\_AFGUARD\\_Ex\\_rev2.3\\_Englisch.pdf](https://www.faudi-aviation.com/fileadmin/user_upload/BA_AFGUARD_Ex_rev2.3_Englisch.pdf).
3. *Луговцов А.В., Никитин С.Ю., Приезжев А.В. // Квант. электрон.* 2008. Т. 38. № 6. С. 606.
4. *Katsumata T., Aizawa H., Komuro S. et al. // Int. Dairy J.* 2020. V. 109. Art. No. 104743.
5. *Калашиников С.П., Мацвейко А.А. // Приб. и техн. эксп.* 1981. № 2. С. 169.
6. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02975280/document>.

### **Investigation of light scattering on water-in-oil emulsions to control the water content in an immiscible liquid**

**A. I. Ponomarev<sup>a, \*</sup>, O. A. Zayakin<sup>b</sup>, S. P. Kotova<sup>b</sup>, N. N. Losevsky<sup>b</sup>, T. N. Sapsina<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Samara National Research University, Samara, Russia*

<sup>b</sup> *Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Samara, Russia*

*\*e-mail: andrey2000\_10@mail.ru*

The dependence of light scattering on small water droplets in an immiscible liquid on the observation angle and the amount of water has been studied to develop a sensor for monitoring the amount of water in aviation fuel. The work is aimed at finding the optimal scattering angle to obtain the highest sensitivity and monotonicity of the signal depending on the amount of water.