

УДК 621.37

DOI: 10.12737/article_592d1611721c60.85207792

М.А. Якимова, аспирант,
Д.М. Мельников, к.т.н.,
А.Б. Садков, студент,
А.Г. Григорьянц, д.т.н.,

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)

E-mail: mt12@bmstu.ru; Marya.korotaeva@yandex.ru

Фотоакустическая гомогенизация вещества для оптических измерений*

Представлены теоретическое и экспериментальное исследования применения фотоакустического эффекта для гомогенизации дисперсных веществ с целью повышения точности спектральных измерений.

Ключевые слова: фотоакустический эффект; дисперсность частиц; гомогенизация.

M.A. Yakimova, Post graduate student,
D.M. Melnikov, Can. Eng.,
A.B. Sadkov, Student,
A.G. Grigoriyants, D. Eng.

(Bauman STU of Moscow, Building 1, 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005)

Photo-acoustic substance homogenization for optical measurements

Theoretical and experimental investigations of photo-acoustic effect use for the homogenization of dispersion particles with the purpose of spectral measurement accuracy increase are shown.

Keywords: photo-acoustic effect; particle dispersiveness, homogenization.

Одним из актуальных направлений развития измерительной техники является разработка приборов и методов исследования качественного и количественного состава веществ, имеющих неоднородную структуру, например, содержащих большое количество компонентов, рассеивающие частицы.

Широко распространенные в настоящее время спектральные методы анализа предназначены, в первую очередь, для анализа однородных веществ, и при проведении измерений параметров полидисперсных многокомпонентных веществ встречаются следующие

сложности [1], например, перекрытие сигналов от различных компонентов, размытие сигнала в следствии дисперсности частиц по размерам и др.

Чтобы снизить погрешность измерений и повысить их разрешающую способность применяют различные способы пробоподготовки [1]: разделение компонентов химическими или физическими способами, гомогенизация пробы и др.

Из приведенных выше факторов, влияющих на погрешность спектральных измерений, наибольшую сложность представляет дисперсия рассеивающих частиц по размерам. Рассеяние излучения на частицах приводит к изменению пространственного распределения

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.

излучения после прохождения слоя вещества.

В случае монодисперсных частиц этот процесс может быть учтен при обработке результатов экспериментов. Если же размеры частиц обладают существенным разбросом (а при этом часто не известен вид распределения и его параметры), учет влияния рассеяния становится крайне затруднительным [2]. И хотя разработан ряд методов обработки результатов измерений, учитывающих это влияние, на практике для снижения погрешности, как правило, используется предварительная обработка пробы, а именно – гомогенизации пробы. Этот процесс заключается в измельчении частиц под действием различных физических процессов до размеров, обладающих наибольшей стабильностью.

В частности, гомогенизация молока предусмотрена при проведении фотометрического анализа содержания жира в молоке. Молоко нагревается до температуры 40°, гомогенизируется, после чего охлаждается до температуры 20°. Эта процедура требует дополнительного оборудования, занимает сравнительно много времени (15...20 мин), при этом, не обеспечивая высокой степени равномерности распределения частиц по размерам [3].

В приборостроении, как правило, используются ультразвуковые гомогенизаторы. В этом случае расплавленный жир дробится на частицы размерами 0,3...1,0 мкм под действием акустических волн. Однако ультразвуковые гомогенизаторы обладают остаточной дисперсией около 1,8...2,0 мкм. Кроме того, распределение по размерам по объему вещества не является однородным и зависит от расстояния до щупа. Это приводит к существенной остаточной погрешности.

Альтернативой использованию ультразвуковых гомогенизаторов, источником акустических волн в которых являются механические колебания, может быть фотоакустическая гомогенизация пробы. Фотоакустический эффект наступает при поглощении лазерного излучения веществом и генерации акустической волны вследствие быстрого локального нагрева и расширения вещества [4]. Возникающая при этом акустическая волна, при правильном выборе параметров лазерного излучения может вызвать дробление частиц жира, т.е. гомогенизацию молока.

Преимущества лазерного возбуждения ультразвука заключаются в том, что гомогенизацию жира можно проводить непосредственно в области проведения измерений; при этом может быть использован тот же лазер, что для

проведения последующих измерений, но с большей мощностью излучения. Естественно, в этом случае необходима возможность изменения мощности излучения лазера.

Стоимость экспериментальной установки возрастет, но сократится время проведения экспериментов и снизится количество дополнительного оборудования. Гомогенизированной будет именно та область пробы, для которой проводят измерения, что также будет способствовать снижению погрешности измерений.

Теоретические основы метода. Частицы жира, находящиеся в зоне распространения акустической волны, испытывают деформации. Как правило, при расчетах принимают, что механическая прочность биологического объекта позволяет выдерживать деформацию, не превышающую 20 % от ее размера. Деформация частицы, вызванная акустической волной, может быть в первом приближении определена из соотношения:

$$\Delta x = \frac{F}{kS}, \quad (1)$$

где Δx – деформация частицы; F – давление, действующее на частицу; S – площадь сечения частицы; k – вязкость частицы.

Расчет оказываемого давления требует определения ряда параметров акустической волны. Генерация акустической волны происходит в результате нагрева малой области, облучаемой лазерным излучением, расширения этой области и возникновения перепадов плотности [5].

Расчет силы, действующий в этом случае на частицу, находящуюся в области распространения акустической волны, может быть произведен исходя из следующих соображений [1].

Амплитуда акустической волны определяется по формуле

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I_0}{\rho c_p} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) f(r), \quad (2)$$

где φ – скалярный потенциал поля скоростей; Δ – оператор Лапласа; c_0 – скорость света в рассматриваемой жидкости; β – объемный коэффициент температурного расширения; c_p – коэффициент теплопроводности.

Потенциал силы рассчитывается по формуле

$$U = 2\pi r_s^3 \rho \left(\frac{\overline{p_i}^{-2}}{3\rho^2 c_0^2} f_1 - \frac{\overline{v_i}^{-2}}{2} f_2 \right), \quad (3)$$

где $\overline{p_i}^{-2}$ и $\overline{v_i}^{-2}$ – усредненные по времени квадраты давления и скорости акустической волны в среде, а постоянные f_1 и f_2 определяются из выражений:

$$f_1 = 1 - \frac{c_0 \rho}{c_s^2 \rho_s}; \quad (4)$$

$$f_2 = 2 \frac{\rho_s - \rho}{2\rho_s + \rho}. \quad (5)$$

Усредненные по времени потенциальная и кинетическая энергии рассчитываются по формулам:

$$\overline{V_i} = \frac{1}{2} \rho \overline{v_i}^{-2}; \quad (6)$$

$$\overline{T_i} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c_0^2} \overline{p_i}^{-2}. \quad (7)$$

И наконец, сила, действующая на частицу, будет определяться зависимостью

$$U = 2\pi r_s^3 \left(\frac{2}{3} f_1 F_1 - f_2 F_2 \right), \quad (8)$$

где

$$F_1 = \nabla \overline{T_i}; \quad F_2 = \nabla \overline{V_i}.$$

На рис. 1 приведен график, демонстрирующий зависимость силы, действующей на частицу, от расстояния до центра лазерного луча. Из графика видно, что на определенном расстоянии от центра луча происходит изменение знака силы. В случае, когда частица жира попадает в данную область, будет наблюдаться эффективная гомогенизация частиц жира.

Однако для этого необходимо, чтобы интенсивность излучения была достаточной для достижения необходимой деформации частиц жира. Расчеты показывают, что для достижения деформации, вызывающий дробление частиц жира, необходима средняя мощность лазерного излучения порядка 100 мВт, что вполне достижимо в современных лазерных установках.

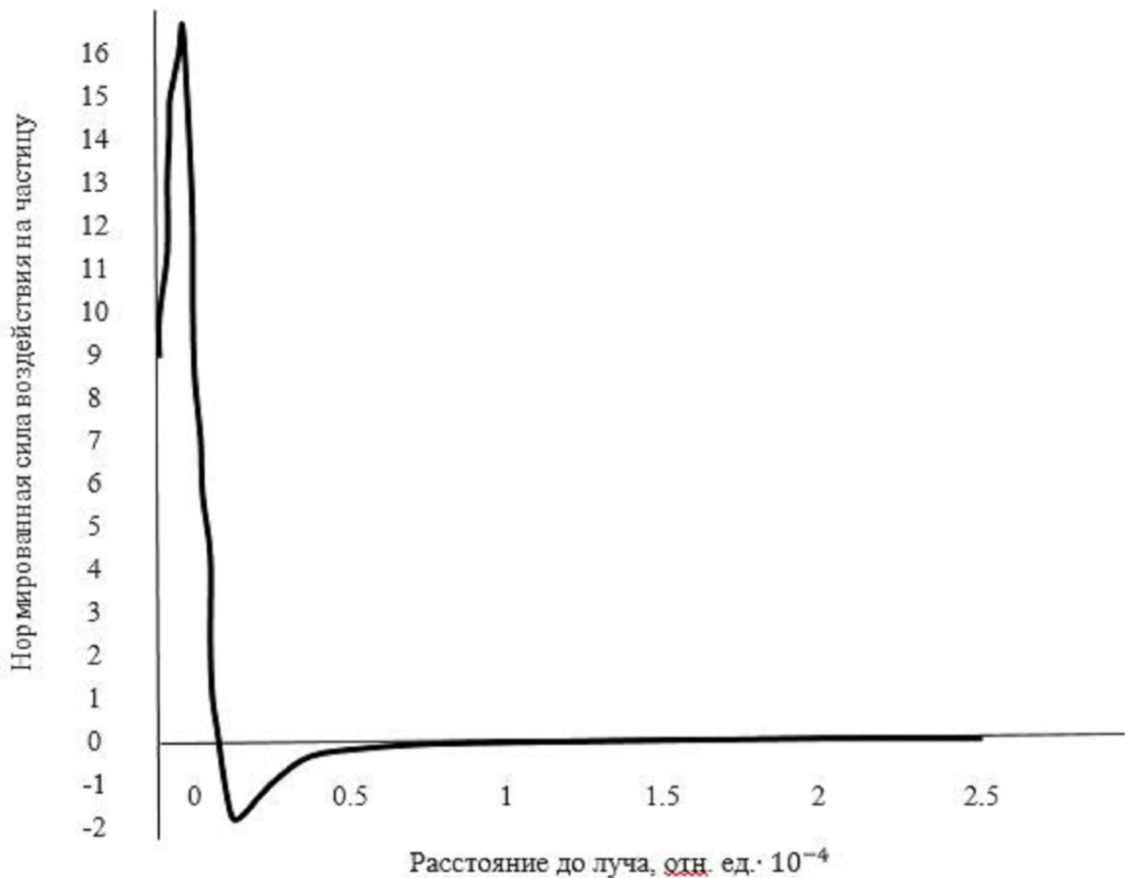


Рис. 1. Зависимость силы, действующей на частицу, от расстояния до центра лазерного луча

Экспериментальная часть. Экспериментальное исследование было проведено на установке, приведенной на рис. 2. В качестве источника излучения был использован лазер на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом. Излучение при помощи коллими-

рующей системы вводилось в оптическую систему фотометра. Мощность излучения регулировалась при помощи набора поглощающих светофильтров. Исследуемая проба молока помещалась в кювету, обеспечивающую толщину слоя образца порядка 30 мкм.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемого образца использовалось негомогенизированное молоко, жирность которого была определена стандартизованным методом (методом Розе-Готлиба), и составляла 2,0; 3,5; 4,9 %. При проведении экспериментов проба облучалась более мощной последовательностью импульсов лазерного излучения, которые должны были вызвать гомогенизацию частиц жира. После этого интенсивность излучения уменьшалась с помо-

щью светофильтров, и проба облучалась серией импульсов, которая использовалась для измерения концентрации жира в пробе.

Эксперименты проводились для различной интенсивности гомогенизирующих импульсов. На рис. 3 приведен график зависимости погрешности измерений, проведенных после воздействия гомогенизирующих импульсов различной интенсивности.

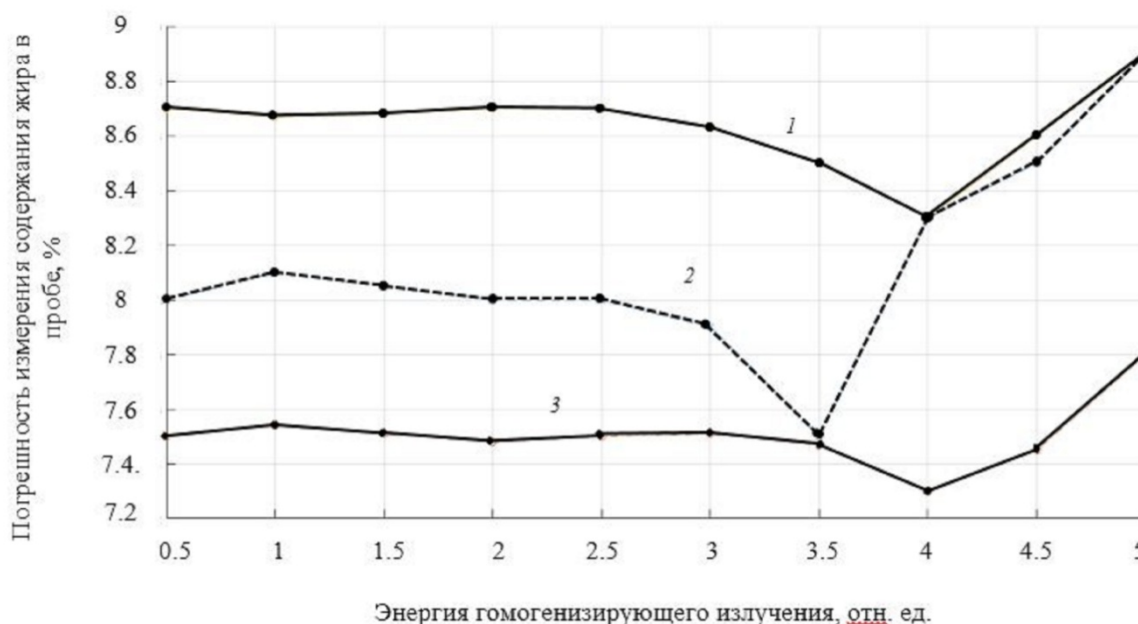


Рис. 3. Зависимость погрешности фотометрических измерений от энергии гомогенизирующего излучения: 1 – жирность 4,9 %; 2 – жирность 3,5 %; 3 – жирность 2 %

Видно, что в определенном диапазоне интенсивности гомогенизирующего излучения наблюдается изменение погрешности измерений. Причем имеет место оптимальная энергия излучения, при превышении которой по-

грешность измерений начинает быстро возрастать, что может быть связано с образованием воздушного пузырька в результате фотоакустического эффекта при высокой интенсивности поглощенного излучения.

Выводы

Экспериментальные результаты показывают, что применение фотоакустической гомогенизации позволяет снизить погрешность фотометрических измерений, причем процесс пробоподготовки и измерений производится на одной и той же установке, что является оптимальным для практического применения предлагаемой методики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г., Якимова, М.А., Мельников, Д.М., Баранов, Д.А. Фотоакустическая гомогенизация молока с целью повышения точности спектрального анализа // *Контенант*. – 2015. – Вып. 1. – С. 101–105.
2. Розенберг, Г.В. Физические основы спектроскопии рассеивающих веществ // *Успехи физических наук*. – 1967. Апрель. Т. 91. – Вып. 4.
3. Якимова, М.А., Алехнович, В.И., Григорьянц, А.Г. Рефрактометр НПВО для исследования рассеивающих веществ // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2017. №5(71). – С. 44–48.
4. Acoustic signals generated by laser- irradiated metal na-

noparticles Sergey Egerev, Sergey Ermilov, Oleg Ovchinnikov; *APPLIED OPTICS* / Vol. 48, No. 7 March 2009

5. Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C., Phys J. D: *Appl. Phys.*, 38, 2662-2674 (2005).

REFERENCES

1. Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G., Yakimova, M.A., Melnikov, D.M., Baranov, D.A. *Photo-acoustic Milk Homogenization for Spectral Analysis Accuracy Increase* // *Contentant*. 2015. Edition 1. pp. 101–105.
2. Rosenberg, G.V. *Physical fundamentals in scattering substance spectroscopy* // *Successes of Physical Sciences*. 1967. April. Vol. 91. Edition 4.
3. Yakimova, M.A., Alekhovich, V.I., Grigoriyants, A.G. NPVO Refractometer for scattering substance investigation // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017. №5(71). – С. 44–48.
4. Acoustic signals generated by laser- irradiated metal nanoparticles Sergey Egerev, Sergey Ermilov, Oleg Ovchinnikov; *APPLIED OPTICS* / Vol. 48, No. 7 March 2009
5. Zharov V.P., Malinsky T.V., Kurten R.C., Phys J. D: *Appl. Phys.*, 38, 2662-2674 (2005).

Рецензент д.т.н. В.Н. Ластовица

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru