

УДК 541.1

## МОДЕЛЬ СЕДИМЕНТАЦИИ ТВЁРДЫХ ЧАСТИЦ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 Ю. В. Полянсков, А. Н. Евсеев, В. А. Поройков

Ульяновский государственный университет

В статье рассматривается модель осаждения механических примесей из разнородных материалов с использованием видеоинформации. Предложен метод определения параметров примесей отдельных материалов по анализу их совместного изображения с использованием дискретного преобразования Фурье.

*Авиационное топливо, седиментация, твёрдые примеси, видеоинформация, преобразование Фурье.*

При проведении седиментационного анализа концентрации и гранулометрического состава твёрдых частиц в жидких средах разработчики и исследователи приборов очень часто принимают допущение, что примеси одного материала превалируют в общей массе, и концентрацией других примесей пренебрегают [1]. Это допустимо, например, при анализе примесей в технологических жидкостях при механообработке, в том числе при шлифовании [2]. Но при оценке параметров твёрдых частиц в других жидких средах (маслах, топливах и т.д.) нередко возникает необходимость контроля примесей, состоящих из разнородных материалов.

В подобных случаях необходимо использовать различные системы. Это мо-

гут быть как системы, оценивающие форму или размер примесей одного материала без использования седиментации на основе изменения параметров рассеяния света на частицах, так и приборы с непосредственным измерением плотности частиц одного материала или приборы, использующие косвенные измерения вспомогательных параметров. Для частиц разных материалов задача может быть решена путём построения математической модели, позволяющей сортировать частицы объёма и массы в соответствии с выбранными группами.

Так, например, анализ чистоты авиационного топлива показал наличие нескольких групп примесей, состоящих из разнородных материалов. Результаты проведённого анализа собраны в табл. 1.

Таблица 1. Виды примесей, встречающихся в авиационном топливе

Материал частицы	сталь	титан	коррозия металла	атмосферная пыль	алюминий	клей от фильтров	нити от фильтров
Плотность частиц $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7800	4500	4000	3000	2700	2000	1100

Из табл. 1 следует, что в примесях, содержащихся в авиационном топливе, присутствуют материалы, по крайней мере, семи групп. Очень часто содержание их в объёме является величиной одного порядка. В этом случае известные модели

для оценки гранулометрического состава примесей не работают или имеют большую погрешность измерений, что при малых концентрациях примесей является неприемлемым.

В предлагаемом авторами приборе используется датчик на основе видеокамеры, с помощью которой анализируется процесс седиментации частиц, ранее исследовавшийся в датчиках фотометрического контроля [3]. Были проанализированы математические модели для седиментационного анализа и произведена их доработка для обработки данных видеоизображения на поверхности осаждения [4].

При этом была разработана методика обработки данных видеоизображения, позволяющая снизить погрешности стадии перехода от частицы ко всему массиву примесей и подготавливающая данные для последующей обработки с использованием разработанной математической модели. Данная методика состоит из алгоритма определения площади, занимаемой частицами на поверхности осаждения в данный момент времени, служащего для вычисления значений функции кривой накопления площади занимаемой частицами примесей посредством оценки информационной избыточности изображения [3, 5] и математической модели осаждения частиц примесей, связывающей площадь, занимаемую частицами примесей на поверхности осаждения, с параметрами частиц примесей:

$$n_0 \left( \sqrt{\frac{h}{Kt}} \right) = - \frac{2S''(t)K^{\frac{3}{2}}t^{\frac{5}{2}}}{\rho h^2}. \quad (1)$$

Здесь  $n_0 \left( \sqrt{\frac{h}{Kt}} \right)$  – искомый параметр, выражающий количество частиц заданного радиуса  $r$ ,  $S''(t)$  – вторая производная от площади  $S(t)$ , занимаемой осевшими частицами;  $K = \frac{2g(r - r_0)}{9h}$  – коэффициент, зависящий от плотности топлива  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>, плотности частиц примесей  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> и вязкости топлива  $\eta$ , Па·с;  $h$  – высота седиментации, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В свою очередь, площадь, занимаемая осевшими частицами  $S(t)$ , определяется с помощью математической модели, описывающей седиментацию примесей:

$$S(t) = S_0 e^{-\left(\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1\right)} \left[ t - t \Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1}\right) + e^{\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1} \Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1} - \sigma_1\right) \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  и  $\mu_1$  – безразмерные параметры функции, аппроксимирующей кривую накопления;  $S_0$  – максимальная площадь, занимаемая частицами, м<sup>2</sup>;  $\Phi(x)$  – стандартное нормальное распределение.

Особенностью примесей авиационного топлива является разнообразие присутствующих в нём материалов с различными значениями плотности. Это приводит к необходимости усложнения математической модели для учёта этой особенности.

В процессе седиментации частиц равной плотности время осаждения  $t$  однозначно связано с размером частиц  $r$  [1]:

$$t(r) = \frac{h}{K \cdot r^2} = \frac{9hh}{2g(r - r_0)} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (3)$$

В случае присутствия в пробе частиц с разной плотностью скорость их осаждения будет напрямую зависеть от плотности:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{2g(r_1 - r_0)}{9h} \cdot r^2, \\ V_2 &= \frac{2g(r_2 - r_0)}{9h} \cdot r^2, \\ &\dots \\ V_m &= \frac{2g(r_m - r_0)}{9h} \cdot r^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m$  – плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда время осаждения частиц будет функцией двух переменных: от плотности и радиуса частиц. В этом случае формула (3) примет вид:

$$t(r, \rho) = \frac{9hh}{2g} \cdot \frac{1}{(r_m - r_0)r^2}, \quad (5)$$

где  $\rho_m$  – плотность материала частиц, кг/м<sup>3</sup>, зависящая от вида примесей.

Графически функция (5) в трёхмерных декартовых координатах может быть представлена поверхностью, изображён-

ной на рис. 1.

При этом необходимо принять во внимание, что реальные примеси авиационного топлива имеют характерный, ограниченный разброс значений плотностей материалов с дискретно изменяющимися значениями (табл. 1).

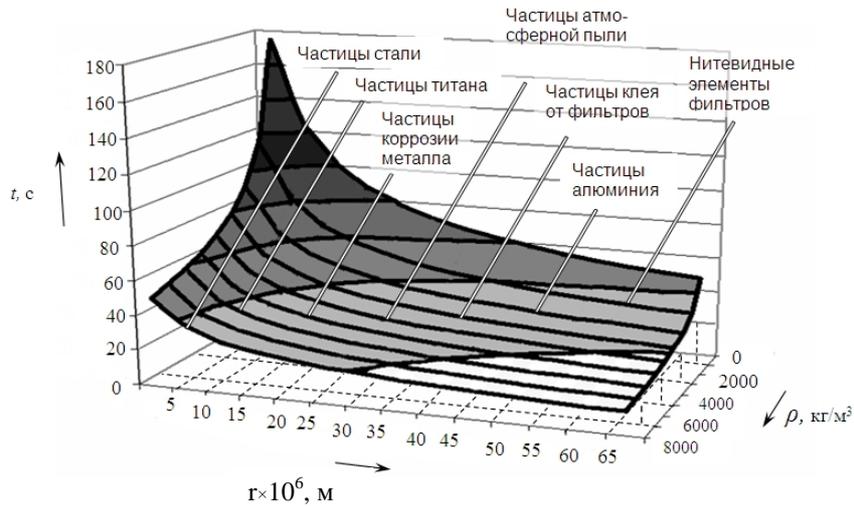


Рис. 1. График зависимости времени осаждения частиц  $t$  от их радиуса  $r$  и плотности  $\rho$

Количество чередующихся тёмных и светлых областей изображения с мелкими частицами примесей (рис. 2а) существенно больше, чем количество изображений чередующихся тёмных и светлых областей с крупными частицами (рис. 2б).

Анализ изображений частиц примесей на поверхности осаждения позволяет сделать вывод, что размер частиц находится в соответствии со значением периода изменения превалирующих гармоник (рис. 2 в, г). Это можно видеть на графиках зависимости изменения относительной яркости пикселей от их порядкового номера при условии линейного упорядочивания элементов изображения.

Это позволяет применить преобразование Фурье для определения доминирующего в изображении набора частот, а следовательно, и плотности материала частиц примесей.

Прямое дискретное преобразование Фурье значений амплитуды  $X_k$  для гармоники колебаний яркости с частотой  $k$  имеет вид [6]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad k=0, \dots, N-1, \quad (6)$$

где  $N$  – количество пикселей в обрабатываемом изображении,  $x_n$ ,  $n = 0, \dots, N-1$  – значение яркости для пикселя с номером  $n$ .

Анализ графиков (рис. 2 д, ж) показывает, что группирование мелких частиц происходит в начале диапазона частоты изменения яркости, а крупных – в конце. Это указывает на возможность использования данного эффекта для оценки размеров частиц из разнородных материалов.

Экспериментальная проверка проводилась путём сравнения с результатами, полученными по стандартным методикам [1], использующим усреднённые плотности. Полученные распределения частиц приведены на рис. 3.

Таким образом, разработанная модель позволяет создать математический аппарат для построения приборов оценки наличия разнородных механических примесей в жидких средах, в том числе в авиационном топливе.

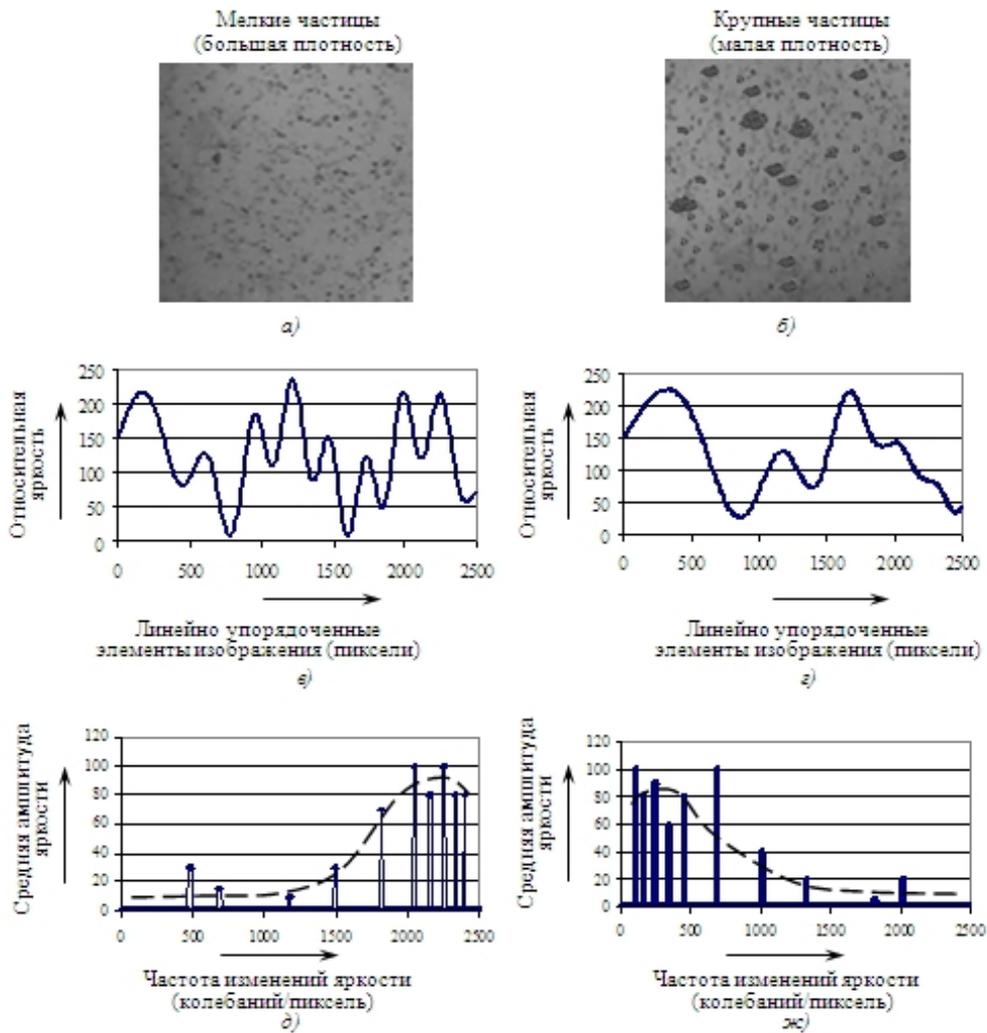


Рис. 2. Связь частот изменения яркости и размеров частиц:  
 а) и б) – типичный пример видеокadra изображения частиц; в) и г) – зависимости относительной яркости изображений от линейно-упорядоченных элементов изображения; д) и ж) – зависимости средней амплитуды яркости от частоты её изменения

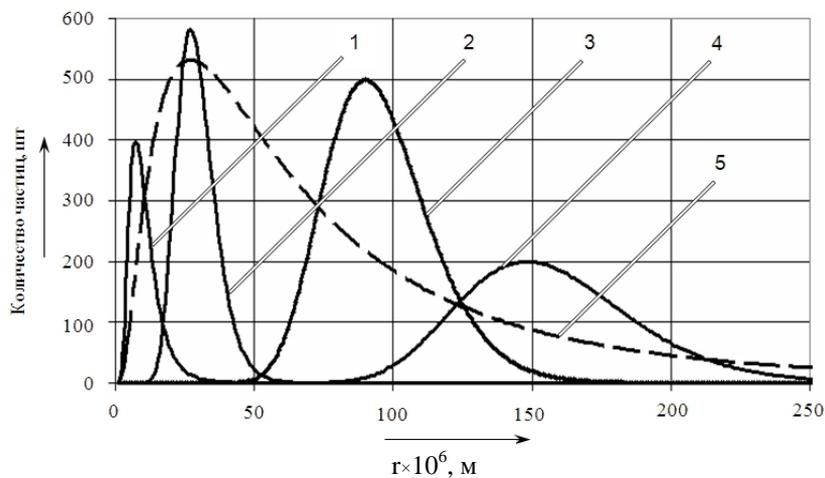


Рис. 3. Результаты распределения частиц, полученные по предлагаемой модели и по стандартным методикам. Кривые графиков соответствуют материалам: 1 – титан, 2 – алюминий, 3 – сталь, 4 – атмосферная пыль, 5 – результат использования стандартных методов оценки, предполагающих наличие в жидкости частиц только одного материала

**Библиографический список**

1. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст] / П.А. Коузов, Л.Я. Скрябина. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
2. Евсеев, А. Н. Моделирование систем применения и управления параметрами смазочно-охлаждающих жидкостей на операциях механообработки [Текст] / А.Н. Евсеев, Ю.В. Полянсков; Министерство образования и науки РФ; Ульяновский государственный университет. – М.: Экономика, 2010. – 356 с.
3. Полянсков, Ю.В. Модель осаждения примесей для прибора седиментационного анализа на основе обработки видеоинформации [Текст] / Ю.В. Полянсков, А.Н. Евсеев, В.А. Поройков // Известия ВУЗов «Машиностроение», – 2008. – №12. – С. 73-80.
4. Евсеев, А.Н. Управление качеством авиационного топлива при эксплуатации самолётов с использованием методов видеоконтроля [Текст] / А.Н. Евсеев, В.А. Поройков // Сборник научных трудов 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Опыт и проблемы внедрения систем управления жизненным циклом изделий авиационной техники». – Ульяновск, УлГУ, 2011. – С. 128-135.
5. Евсеев, А.Н. Исследование возможности седиментационного анализа при оценке загрязнённости авиационного топлива [Текст] / А.Н. Евсеев, В.А. Поройков // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции «Опыт и проблемы внедрения систем управления жизненным циклом изделий авиационной техники». – Ульяновск, УлГУ, 2011. – С. 30-35.
6. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко, – СПб.: Питер, 2006. – С. 751.
7. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение [Текст]: справочник / под ред. В. М. Школьников – 2-е изд.. – М.: Химия, 1999. – 596 с.

**MODEL OF SEDIMENTATION OF SOLID PARTICLES OF HETEROGENEOUS MATERIALS**

©2012 Yu. V. Polyanskov, A. N. Evseev, V. A. Poroykov

Ulyanovsk State University (UISU)

The paper presents a model of sedimentation of mechanical impurities of heterogeneous materials with the use of video information. A method is proposed for determining the parameters of individual materials on the basis of the analysis of their combined image using discrete Fourier transform.

*Aviation fuel, sedimentation, solid impurities, video information, Fourier transform.*

**Информация об авторах**

**Полянсков Юрий Вячеславович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования технических систем, Ульяновский государственный университет. E-mail: [yil-rimma@yandex.ru](mailto:yil-rimma@yandex.ru). Область научных интересов: технологии поддержки жизненного цикла продукции.

**Евсеев Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования технических систем, Ульяновский государственный университет. E-mail: [evseev.evan@yandex.ru](mailto:evseev.evan@yandex.ru). Область научных интересов: технологические операции механообработки, управление жизненным циклом продукции.

**Поройков Вадим Александрович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры математического моделирования технических систем, Ульяновский государственный университет. E-mail: [v.poroykov@mail.ru](mailto:v.poroykov@mail.ru). Область научных интересов: информационные технологии в управлении технологическими операциями, ERP системы в управлении.

**Polyanskov Yuriy Vyacheslavovich**, doctor of technical science, professor, head of the department of mathematical modeling of engineering systems, Ulyanovsk State University. E-mail: [vil-rimma@yandex.ru](mailto:vil-rimma@yandex.ru). Area of research: PLM technologies.

**Evseev Alexander Nikolaevich**, candidate of technical science, associate professor, the department of mathematical modeling of engineering systems, Ulyanovsk State University. E-mail: [evseev.evan@yandex.ru](mailto:evseev.evan@yandex.ru). Area of research: machining process operations, PLM technologies.

**Poroykov Vadim Aleksandrovich**, candidate of technical science, senior lecturer of the department of mathematical modeling of engineering systems, Ulyanovsk State University. E-mail: [v.poroykov@mail.ru](mailto:v.poroykov@mail.ru). Area of research: information technologies in the management of technological processes, ERP systems in management.