

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИИ ПРОБЫ
СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ
И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО
СОСТАВА ПРИМЕСЕЙ**

Аннотация. Рассматривается моделирование седиментации механических примесей на основе значений второй производной площади, занимаемой достигнувшими дна колбы частицами и определяемой обработкой цифрового видеофильма. Предложен метод снижения погрешностей двойного дифференцирования путем использования особенностей распределения по размерам частиц шлифовального шлама. Получены уравнения и разработаны алгоритмы, позволяющие оценивать дисперсный состав твердых примесей в жидких средах.

Ключевые слова: моделирование седиментации, дисперсный состав, гранулометрический состав примесей.

Y. V. Polyanskov, A. N. Evseev, V. A. Poroykov

**SIMULATING SEDIMENTATION OF LUBRICOOLANT
SAMPLE USING VIDEO DATA AND REGULARITIES
OF IMPURITY GRANULOMETRIC COMPOUND**

Anstract. The article considers the simulation of sedimentation of mechanical impurity based on the values of the second derivative of the area occupied by the particles that reached the bottom of the flask and determined by the digital video processing. The authors suggest a method to reduce errors of double differentiation by using the characteristics of grinding sludge particles distribution by size. The researchers have derived the equations and developed the algorithms to evaluate the parameters of impurity solids in liquids.

Key words: sedimentation simulation, powder, impurity granulometric compound.

Седиментационный анализ опирается на процесс осаждения частиц примесей в смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), который происходит со скоростями, зависящими от размера частиц, что ставит общую концентрацию примесей и их гранулометрический состав в аналитическую зависимость от массы (площади) накапливающегося осадка [1, 2]. Это позволяет эффективно производить оценку параметров частиц механических примесей, которые попадают в СОЖ при шлифовании на производстве [2]. Взвешивание массы накапливающегося осадка в весовом анализе, измерение степени рассеивания света частицами примесей в фотоседиментационном анализе являются наиболее распространенными принципами производственных реализаций седиментационного анализа [3, 4].

Сложность и продолжительность проведения точного взвешивания в весовом анализе, необходимость совмещать в измерении веса и емкости СОЖ значительно снижают оперативность замеров, соответствие устройства

производственным условиям. Хотя использование световых датчиков в фотоседиментационном анализе упрощает конструкцию прибора, аналоговая обработка фотосигнала в автономных приборах снижает возможную точность [5].

1. Особенности конструкции прибора, обусловленные работой с цифровым видеофильмом

Увеличить точность, упростить конструкцию прибора и повысить эффективность обработки данных позволяет использование потенциала цифровой техники [6, 7]. В частности, видеофильм несет в себе информацию о каждой частице механических примесей (ее положении и размере). С другой стороны, применяющийся в существующих приборах [5] фотосигнал о степени рассеяния частицами примесей луча света сводит эту информацию в один усредненный параметр – яркость. Таким образом, цифровой видеофильм является источником большей информации о примесях и, следовательно, его обработка позволит получить более точные данные о параметрах примесей.

Современный уровень развития электронной техники позволяет осуществить интеграцию прибора с персональной ЭВМ. К положительным результатам такой интеграции можно отнести:

1) отсутствие в конструкции прибора блока обработки сигналов, функции которого отводятся программной части прибора (ЭВМ);

2) обеспечение эффективной обработки данных и необходимого информирования о результатах анализа по компьютерным сетям;

3) повышение оперативности замеров вследствие меньших затрат времени на обслуживание прибора без блока обработки сигналов (п. 1) и использования ЭВМ при расчетах параметров примесей.

Рассмотрим подробнее конструкцию прибора и предложенную математическую модель связи общей концентрации и гранулометрического состава механических примесей с площадью, покрывающей дно колбы при седиментации пробы СОЖ.

Для фиксации изображения находящихся на дне колбы примесей необходимо использовать подсветку светодиодами **1** и **8**, располагающуюся, как показано на рис. 1, в достаточной близости от поверхности осаждения **9**. Колба выполняется из непрозрачного материала. Располагающаяся непосредственно под стеклянным дном пробы **9** цифровая камера **10** передает цифровой видеофильм с ростом занимаемой осадком площади в ЭВМ по USB-интерфейсу.

2. Оптимальное начальное распределение примесей по объему пробы СОЖ

Для построения прибора и его программной части имеет значение выбор начального распределения примесей по объему пробы. Существует два наиболее распространенных и отвечающих производственным условиям варианта.

Вариант 1. Предварительное сосредоточение примесей у противоположной дну границы пробы СОЖ с последующим однократным переворачиванием колбы на 180° перед началом эксперимента.

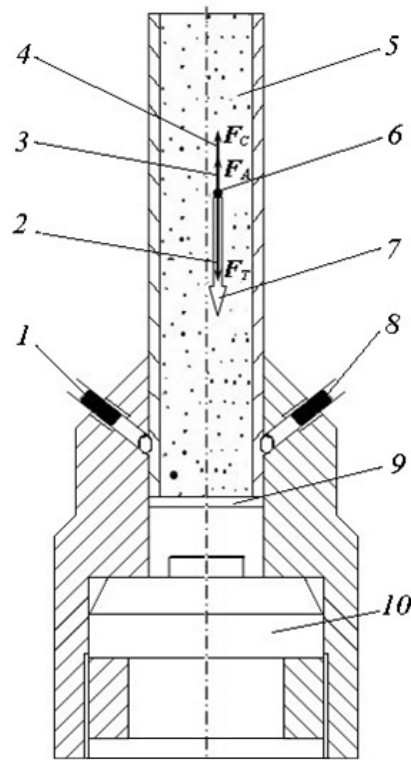


Рис. 1. Схема прибора, осуществляющего седиментационный анализ с использованием ЭВМ: 1, 8 – светодиоды; 2, 3, 4 – соответственно силы тяжести, Архимеда и сопротивления оседанию; 5 – СОЖ; 6 – частица примесей; 7 – направление оседания; 9 – стекло; 10 – цифровая видеокамера

В этом варианте начальное скопление примесей в горизонтальной плоскости у дна колбы переходит в результате зависящей от размеров частиц скорости оседания в распределенную по высоте совокупность групп примесей. Эти группы состоят из частиц с одинаковым радиусом и осаждаются, сохраняя начальное взаимное относительное расположение в горизонтальной плоскости. Такое сосредоточение при седиментации частиц равных радиусов в горизонтальные плоскости приводит к тому, что влияние конкретной группы частиц на кривую накопления происходит исключительно в момент оседания. Учитывая необходимость двукратного дифференцирования в математической модели, можно сделать вывод, что кривая накопления, построенная на одномоментных приращениях, будет содержать в себе дополнительные недопустимые погрешности. К другому недостатку этого варианта относится необходимость неопределенных затрат времени на гарантировано полное выпадение всех примесей в осадок, которые при анализе мелких примесей и использовании вязких СОЖ могут быть значительны.

Вариант 2. Равномерное распределение частиц примесей по объему пробы посредством многократных переворачиваний колбы на 180° перед началом эксперимента.

К преимуществам этого варианта относится потребность в меньших затратах производственного времени, так как равномерное распределение до-

стигается несколькими элементарными переворачиваниями в противоположные стороны. В этом варианте начальное равномерное распределение примесей по объему колбы переходит в результате зависящей от размеров частиц скорости осаждения в распределенную по высоте совокупность пространственно вложенных друг в друга групп примесей. Эти группы, состоящие из частиц с одинаковым радиусом, осаждаются, сохраняя начальное равномерное распределение, но все по меньшей высоте. Такое распределение при седиментации частиц равных радиусов по уменьшающейся высоте обеспечивает сравнительно с первым вариантом плавное влияние конкретной группы частиц на кривую накопления. Это влияние осуществляется в течение всего времени от начала эксперимента до момента выпадения наиболее высоко расположенных частиц.

Следует заметить, что данный вариант не требует перемешивающих вращений колбы при встраивании в поточную автоматизированную систему использования СОЖ. В последнем случае эффективно использование уже существующего равномерного распределения частиц примесей в процессе движения СОЖ по трубам без вращения колбы.

Таким образом, второй вариант является предпочтительным для разработки прибора, поэтому математическая модель рассчитана на его использование.

3. Определение суммарной площади проекций частиц, достигающих дна в процессе седиментации

Последовательная обработка кадров цифрового видеofilьма с процессом седиментации производится программной частью прибора на базе ЭВМ и позволяет получить количественную оценку занятой частицами примесей площади.

В ЭВМ хранятся только параметры наименьших элементов изображений (пикселей) в цифровом виде, занимающие некоторый объем памяти в байтах. Так как для всех пикселей параметры, необходимые для хранения, однотипны, то число занимаемых кадром байт в памяти ЭВМ пропорционально числу содержащихся в нем пикселей.

Вследствие выбранной конструкции прибора число пикселей, соответствующих примесям или СОЖ, пропорционально занимаемой ими площади на дне колбы (рис. 2).

Следовательно, площадь, занимаемая частицами примесей $S_{\text{п}}$, может быть вычислена следующим образом:

$$S_{\text{п}} = C_{\text{п}} q_{\text{п0}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{п0}}$ – количество байт, соответствующих частицам примесей; $C_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности, получаемый экспериментальным путем и зависящий от типа применяемой цифровой видеокамеры.

Таким образом, для определения суммарной площади проекций частиц, достигающих дна в процессе седиментации, следует установить количество занимаемых ими байт в изображении. На основе информационных свойств изображений (яркость, однородность, информационная избыточность и т.д.) осевших примесей в СОЖ предлагается два возможных варианта.

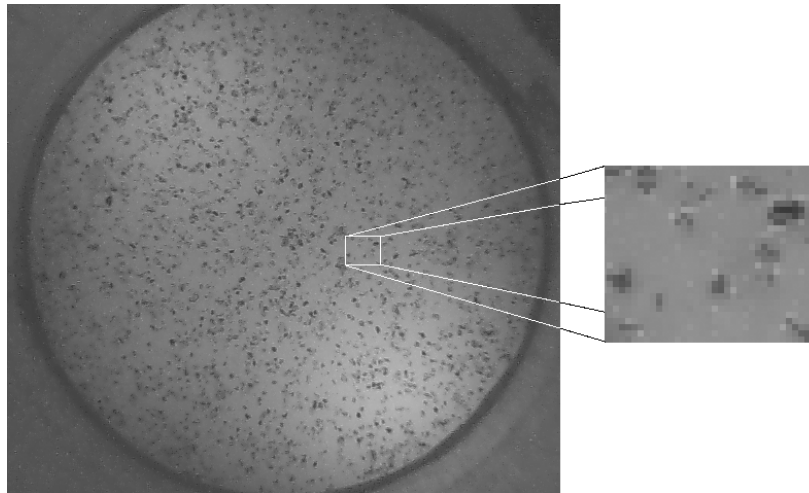


Рис. 2. Достигнувшие дна частицы примесей на кадре цифрового видеофильма седиментации пробы СОЖ в момент проведения эксперимента. На увеличенной части изображения справа можно видеть отсутствие четкой границы между изображениями СОЖ и частиц примесей

Вариант 1. Использование параметра яркости наименьших элементов изображения (пикселей) для их разделения на две группы по отношению к определяемому экспериментальным путем числовому критерию: имеющие большую яркость относятся к СОЖ, а меньшую – к частицам примесей. Фактически этот вариант является количественным выражением зрительно наблюдаемой закономерности – различия в яркости между жидкостью и примесями. К положительному моменту этого подхода относится его явный физический смысл, а к отрицательным – отсутствие аналитического выражения для определения числового критерия и зависимость от уровня освещенности, который может снизить даже значительное выпадение частиц примесей.

Вариант 2. Использование различий в информационной избыточности изображений СОЖ и механической примеси, заключающихся в следующем:

- вследствие однородности СОЖ пиксели, ей отвечающие, имеют незначительные отклонения по яркости (вызванные освещением) от соседних. Поэтому данные, необходимые для хранения изображений СОЖ, однотипны и обладают большой информационной избыточностью;

- пиксели, соответствующие частицам примесей, существенно отличаются по яркости от соседних как в силу небольших площадей частиц примесей, так и в силу непрозрачности их материала по сравнению с СОЖ. Поэтому данные, отвечающие частицам примесей, имеют минимальную информационную избыточность.

Эти различия позволяют для определения занятой частицами примесей площади использовать методы оценки информационной избыточности, которые разработаны в теории сжатия изображений [8].

Пусть отношение сжатых одним из таких методов данных о частицах примесей к исходным равно k_p , для данных о СОЖ – k_c . Заметим, что коэффициенты отношений зависят только от метода сжатия и не зависят от параметров прибора. Тогда количество несжатых данных (байт) $q_{п0}$, соответствующих частицам примесей, можно представить в виде

$$q_{п0} = \frac{Q_1 - Q_0 k_c}{Q_0 k_{п} - Q_0 k_c} Q_0, \quad (2)$$

где Q_0 и Q_1 – число занимаемых всем кадром байт соответственно до и после сжатия.

Затем по формуле (1) определяется покрываемая частицами площадь.

Таким образом, данный подход к оценке занимаемой частицами механических примесей площади обеспечивает независимость от аппаратной части прибора (освещения, применения оптического увеличения) и не требует настроенных экспериментов на конкретный вид примесей.

4. Модель определения гранулометрического состава примесей по параметрам кривой накопления седиментации пробы СОЖ

Для разработки модели осаждения частиц примесей использовался ряд принятых в современных исследованиях допущений:

- частицы примесей вследствие случайности их формы полагаются шарообразными, т.е. для частиц используется эквивалентный радиус, который имели бы частицы-сферы, осаждающиеся с такой же скоростью [4];

- количество частиц примесей достаточно велико для того, чтобы можно было считать заданной непрерывную функцию $n_0(r)$ – числа частиц для каждого действительного значения $r \in R$ [4];

- осевшие частицы примесей располагаются в один слой без перекрытия их проекций на дно пробы. Это допущение основывается на том, что загрязненные на производстве СОЖ имеют такую концентрацию примесей, что проекции частиц перекрывают друг друга. Если же необходимо провести анализ значительно загрязненной СОЖ, ее пробу всегда можно достаточно разбавить для того, чтобы это допущение выполнялось;

- поток, обтекающий частицы примесей в процессе седиментации, на основании фактически небольших скоростей осаждения можно считать ламинарным, следовательно, частицы под действием сил тяжести и Архимеда движутся согласно закону Стокса с постоянной скоростью V [4]:

$$V = \frac{2g(\rho - \rho_0)}{9\eta} r^2 = Kr^2, \quad (3)$$

где $K = \frac{2g(\rho - \rho_0)}{9\eta}$; η – коэффициент вязкости среды; r – радиус частицы;

ρ – плотность материала механических примесей; ρ_0 – плотность СОЖ; g – ускорение свободного падения.

Тогда при известной высоте колбы для пробы СОЖ h найдем время, необходимое для выпадения последней частицы радиуса r и, следовательно, всей фракции частиц, имеющих радиус r :

$$t = \frac{h}{Kr^2}. \quad (4)$$

Для построения математической модели необходимо найти выражение для возрастающей площади, занимаемой выпадающими в осадок частицами

механических примесей. Выделим сначала множество выпавших в осадок частиц, используя график зависимости (4), чтобы затем использовать его для расчета занимаемой ими площади.

Это множество будет состоять из двух областей, соответствующих:

– частицам, радиусы которых при подстановке в (4) дадут значение времени t меньше текущего, т.е. достаточно тяжелым для достижения дна в заданный промежуток времени с высоты h ;

– частицам, начальная высота которых $h_1 < h$ и радиус при подстановке в (4) также дадут время меньше текущего, т.е. более легким, но ниже расположенным, чем в первой группе.

Графически это множество можно представить как область A на рис. 3.

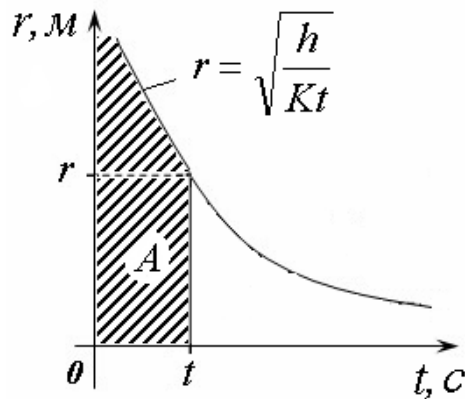


Рис. 3. Показано множество A – частиц механических примесей, выпавших в осадок к моменту времени t в декартовой координатной плоскости радиуса частиц и времени t_0

Из принятого выше допущения о шарообразности частиц примесей следует, что проекция каждой частицы на дно пробы представляет собой круг, а площадь, которую она покрывает, – площадь круга. Таким образом, общую площадь, покрытую осевшими частицами на дне пробы $S(t)$ к моменту времени t , найдем, просуммировав площадь всех кругов – проекций частиц, т.е. взяв интеграл от функции площади частиц по области A :

$$S(t) = \int_A \pi r^2 n_0(r) dA = \int_0^t \int_0^{\sqrt{\frac{h}{K\tau}}} \pi r^2 n_0(r) dr d\tau, \quad (5)$$

где τ – переменная интегрирования.

Для нахождения требуемого нам распределения частиц $n_0(r)$ продифференцируем выражение (5) 2 раза по времени t :

$$S''(t) = \pi \frac{h}{Kt} n_0\left(\sqrt{\frac{h}{Kt}}\right) \left(-\frac{1}{2}\right) \sqrt{\frac{h}{K}} \frac{1}{t^{1.5}} = -\frac{\pi}{2} \frac{h^{\frac{3}{2}}}{K^{\frac{3}{2}} t^{\frac{5}{2}}} n_0\left(\sqrt{\frac{h}{Kt}}\right). \quad (6)$$

Откуда выразим распределение частиц для радиусов $r = \sqrt{\frac{h}{Kt}}$ соответствующих моменту времени t :

$$n_0\left(\sqrt{\frac{h}{Kt}}\right) = -\frac{2S''(t)K^{\frac{3}{2}}t^{\frac{5}{2}}}{\pi h^2}. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой параметрически заданную функцию относительно времени t .

Таким образом, (7) позволяет на основе ряда последовательных значений второй производной площади $S''(t)$, покрываемой осаждающими частицами, получить значения числа частиц примесей для последовательных значений радиусов r , а значит, после интегрирования по всем значениям радиусов и их общую концентрацию:

$$C = \frac{\rho}{\rho_0 V_K} \int_0^{+\infty} V_0(r) n_0(r) dr = \frac{4}{3} \frac{\rho}{\rho_0 V_K} \pi \int_0^{+\infty} r^3 n_0(r) dr, \quad (8)$$

где $V_0(r)$ – объем одной частицы примесей с радиусом r ; V_K – объем колбы прибора с пробой СОЖ.

5. Метод определения параметров седиментационной кривой накопления примесей на основе физико-математических особенностей гранулометрического состава частиц

Применение формулы (7) требует подстановки в нее значений второй производной кривой накопления $S''(t)$, в то время как приведенные выше алгоритмы дают лишь значения занятой частицами механических примесей площади $S(t)$. Известные алгоритмы численного дифференцирования не дают удовлетворительных результатов вследствие погрешностей исходных данных и их роста при взятии производных.

Поэтому для вычисления второй производной кривой накопления $S''(t)$ используется экспериментально подтверждающаяся применимость к частицам примесей шлифовального шлама закона распределения частиц, образующихся при механическом измельчении. Этот закон теоретически обоснован А. Н. Колмогоровым [9] и утверждает, что уравнение распределения таких частиц имеет логарифмически нормальный вид:

$$n_0(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left(-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) = \Phi'_r\left(\frac{\ln r - \mu}{\sigma}\right), \quad (9)$$

где r – радиус частиц; σ и μ – параметры логарифмически нормального распределения; $\Phi(x)$ – функция стандартного нормального распределения.

Подставив уравнение логарифмически-нормального распределения в (7) и 2 раза проинтегрировав, получим математическое выражение кривой накопления для него:

$$S(t) = \bar{S} e^{-\left(\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1\right)} \left[t - t \Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1}\right) + e^{\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1} \Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1} - \sigma_1\right) \right], \quad (10)$$

где $\bar{S}$ – максимальное значение занятой частицами механических примесей площади; σ_1 и μ_1 связаны с параметрами σ и μ логарифмически-нормального распределения (9) следующими зависимостями:

$$\mu_1 = 2 \left(\ln \sqrt{\frac{h}{K}} - \mu - 3\sigma^2 \right),$$

$$\sigma_1 = 2\sigma, \quad (11)$$

где h – высота колбы с пробой СОЖ; K – коэффициент из (3).

Таким образом, для получения значений $n_0(r)$ необходимо найти параметры σ_1 и μ_1 для уравнения (10), что позволит согласно (11) получить σ , μ и функцию $n_0(r)$ по (9) (см. рис. 3).

Анализ уравнения (10) позволяет заключить, что:

– величина $\exp\left(\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1\right)$ является средним значением логарифмически

нормального распределения и в силу этого находится между начальной конечной частями этого распределения. Поэтому из них можно выбрать значе-

ния, ограничивающие $\exp\left(\frac{\sigma_1^2}{2} + \mu_1\right)$;

– так как $\lim_{x \rightarrow +\infty} \Phi(x) = 1$ (причем уже при относительно небольших x

выполняется $\Phi(x) \approx 1$), то при $t \gg 0$ справедливо следующее приближенное равенство:

$$\Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1}\right) \approx \Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1} - \sigma_1\right). \quad (12)$$

Упростив (10) с помощью (12), применяем обратную функцию нормального распределения $\Phi^{-1}(x)$ к $\Phi\left(\frac{\ln t - \mu_1}{\sigma_1}\right)$.

Это позволяет определить ограниченное множество параметров σ_1 и μ_1 , из которого согласно требуемой точности выбирается достаточно большое число пар σ_1 и μ_1 и средствами ЭВМ последовательно подставляются в (10). Пара значений, дающая, наилучшее соответствие с экспериментальными данными кривой накопления, является искомой и позволяет по (11) определить параметры логарифмически нормального распределения примесей, а также с помощью (8) и концентрацию (рис. 4).

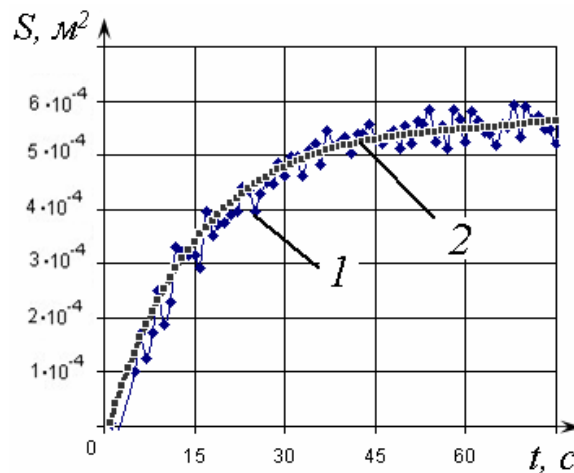


Рис. 4. Обработка информации, поступающей с видеокамеры. Значения кривой накопления I служат для определения параметров σ_1 и μ_1

6. Проверка адекватности

Проверка адекватности проводилась на основе анализа процесса осаждения предварительно равномерно размешанного в СОЖ шлифовального шлама.

Параметры шлама, его масса и распределение числа частиц по их радиусам были определены до его смешивания с СОЖ путем разделения его на фракции. Каждая фракция состояла из частиц с радиусами из последовательных диапазонов, что достигалось поочередным просеиванием первоначальной смеси части через сита со все меньшими пропускными размерами решетки. Из известной плотности шлама по среднему радиусу частиц в каждой фракции было определено число находящихся в ней частиц. Совокупность данных по всем фракциям дало распределение числа частиц по их радиусам, которое показано на рис. 5 (гистограмма 1). После смешивания шлама с СОЖ был проведен эксперимент по седиментации и определению параметров частиц примесей предложенной последовательностью методов (рис. 6).

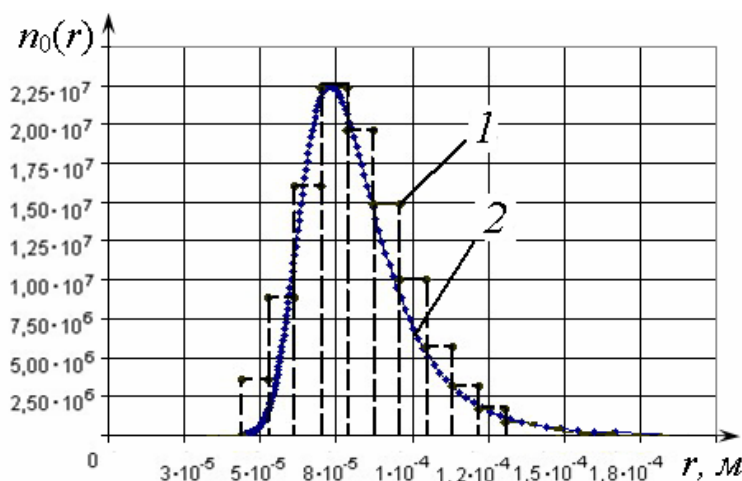


Рис. 5. Заданное перед экспериментом (1) и полученное после обработки (2) моделью кривой осаждения (см. рис. 4) распределение примесей по их радиусам



Рис. 6. Последовательность определения параметров механических примесей в СОЖ – гранулометрического состава и концентрации

Полученные значения параметров примесей совпали с теми, которые были заданы перед экспериментом, с абсолютной погрешностью, не превышающей 10 %.

Таким образом, использование видеоизображения осаждения примесей позволяет устанавливать их параметры: гранулометрический состав и концентрацию.

Заключение

Разработана модель определения концентрации и гранулометрического состава механических примесей в СОЖ на основе значений второй производной площади, занимаемой частицами при седиментации.

На основе модели предложен метод определения параметров примесей по количественной оценке занимаемой частицами площади в последовательные моменты времени. Метод включает разработанный на основе физико-математических особенностей гранулометрического состава примесей, попавших в СОЖ на операциях шлифования, алгоритм получения параметров кривой их распределения по размерам. Метод реализован в конструкции прибора, позволяющего получать изображения занимаемой частицами примесей площади в последовательные моменты времени в процессе седиментации.

Список литературы

1. **Фигуровский, Н. А.** Седиментометрический анализ / Н. А. Фигуровский. – М. : Изд-во АН СССР, 1948. – 332 с.
2. **Ходаков, Г. С.** Седиментационный анализ высокодисперсных систем / Г. С. Ходаков. – М. : Химия, 1981. – 192 с.
3. **Ходаков, Г. С.** Основные методы дисперсного анализа порошков / Г. С. Ходаков. – М. : Стройиздат, 1968. – 199 с.
4. **Коузов, П. А.** Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.
5. **Полянсков, Ю. В.** Диагностика и управление надежностью смазочно-охлаждающих жидкостей на операциях механообработки / Ю. В. Полянсков, А. Н. Евсеев, А. Р. Гисметулин. – Ульяновск, 2000.
6. **Альнерович, Т. А.** Компьютерно-интегрированные производства / Т. А. Альнерович. – М. : ГУП ВИМИ, 1999. – 512 с.
7. **Луис, М.** Камаринха-Матос. Интеллектуальные системы для производства / М. Луис. – Чепмен холл, 2003. – 512 с.
8. **Ватолин, Д. А.** Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. А. Ватолин, А. М. Ратушняк, М. Г. Смирнов, В. Б. Юкин. – Диалог-МИФИ, 2002. – С. 384.
9. **Колмогоров, А. Н.** О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении / А. Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1941. – Т. XXXI, № 2. – С. 99–101.

References

1. **Figurovskiy, N. A.** Sedimentometricheskii analiz / N. A. Figurovskiy. – M. : Izd-vo AN SSSR, 1948. – 332 s.
2. **Khodakov, G. S.** Sedimentatsionnyy analiz vysokodispersnykh sistem / G. S. Khodakov. – M. : Khimiya, 1981. – 192 s.
3. **Khodakov, G. S.** Osnovnyye metody dispersnogo analiza poroshkov / G. S. Khodakov. – M. : Stroyizdat, 1968. – 199 s.
4. **Kouзов, P. A.** Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov / P. A. Kouзов. – L. : Khimiya, 1987. – 264 s.
5. **Polyanskoy, YU. V.** Diagnostika i upravleniye nadezhnost'yu smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey na operatsiyakh mekhanooobrabotki / YU. V. Polyanskoy, A. N. Yevseyev, A. R. Gismetulin. – Ul'yanovsk, 2000.
6. **Al'nerovich, T. A.** Komp'yuterno-integrirovannyye proizvodstva / T. A. Al'nerovich. – M. : GUP VIMI, 1999. – 512 c.
7. **Luis, M.** Kamarinkha-Matos. Intellectual'nyye sistemy dlya proizvodstva / M. Luis. – Chepmen kholl, 2003. – 512 s.
8. **Vatolin, D. A.** Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatiye izobrazheniy i video / D. A. Vatolin, A. M. Ratushnyak, M. G. Smirnov, V. B. Yukin. – Dialog-MIFI, 2002. – S. 384.
9. **Kolmogorov, A. N.** O logarifmicheski-normal'nom zakone raspredeleniya razmerov chastits pri droblenii / A. N. Kolmogorov // DAN SSSR. – 1941. – T. XXXI, № 2. – S. 99–101.

Полянский Юрий Вячеславович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
моделирования технических систем,
Ульяновский государственный
университет (г. Ульяновск,
ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: vil-rimma@yandex.ru

Polyanskoy Yuriy Vyacheslavovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of mathematical
modeling of technical systems,
Ulyanovsk State University
(Ulyanovsk, 42 Lva Tolstogo str.)

Евсеев Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического моделирования
технических систем, Ульяновский
государственный университет
(г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: evseev.evan@yandex.ru

Evseev Alexander Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of mathematical
modeling of technical systems,
Ulyanovsk State University
(Ulyanovsk, 42 Lva Tolstogo str.)

Порошков Вадим Александрович

кандидат технических наук, старший
преподаватель, кафедра математического
моделирования технических систем,
Ульяновский государственный
университет (г. Ульяновск,
ул. Льва Толстого, 42)

E-mail: v.poroykov@mail.ru

Poroykov Vadim Alexandrovich

Candidate of engineering sciences,
senior lecturer, sub-department
of mathematical modeling of technical
systems, Ulyanovsk State University
(Ulyanovsk, 42 Lva Tolstogo str.)

УДК 621.892; 532.7

Полянсков, Ю. В.

Моделирование седиментации пробы смазочно-охлаждающей жидкости с использованием видеоинформации и закономерностей гранулометрического состава примесей / Ю. В. Полянсков, А. Н. Евсеев, В. А. Поройков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 102–114.