

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 681.3

Т.А. Рузова, канд. техн. наук,
А.П. Толстопят, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
В.И. Елисеєв, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,
Л.А. Флеєр

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,
г. Днепропетровск, Украина, e-mail: ruzov1973@bk.ru

СЕГМЕНТАЦИЯ АГРЕГИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСПЕРСНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

Т.А. Ruzova, Cand. Sci. (Tech.),
A.P. Tolstopyat, Cand. Sci. (Tech.), Senior Research
Fellow,
V.I. Yeliseyev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior
Research Scientist,
L.A. Fleyer

O. Gonchar Dnepropetrovsk National University, Dnepropetrovsk,
Ukraine, e-mail: ruzov1973@bk.ru

SEGMENTATION OF AGGREGATED ELEMENTS IN DISPERSIVE FORMATIONS USING THE VORONOI DIAGRAM

Наличие агрегированных образований является одной из основных проблем, возникающих при определении степени дисперсности эмульсий и других тонкоизмельченных материалов.

Цель. Создание метода сегментации агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы, позволяющего обрабатывать агрегаты, содержащие внутренние объекты, контур которых располагается целиком внутри агрегата, без ограничений на число входящих частиц, а также без использования понятия „дефицит выпуклости агрегата“, что дает возможность обрабатывать агрегаты сложной конфигурации.

Методика. Разработанный метод включает следующие этапы: фильтрация изображения и перевод его в монохромный режим; определение координат точек контура агрегата; корректировка контура для устранения возможных разрывов границ при бинаризации изображения; расстановка маркеров частиц по бликам на их поверхности; распределение площади агрегата между входящими в него частицами согласно диаграмме Вороного. Центры и радиусы частиц определялись по площади соответствующей ячейки диаграммы.

Работа метода проиллюстрирована на модельных агрегатах. Приведен график зависимости точности разделения агрегата от степени перекрытия составляющих его объектов. Проиллюстрирована также обработка агрегата в случае наличия в нем внутренних объектов. Приведен пример обработки фрагмента изображения реальной эмульсии второго рода (вода в масле).

Результаты. Предложенный метод позволяет осуществлять разделение агрегированных элементов дисперсных образований, состоящих из частиц сферической формы (капель эмульсий).

Научная новизна. Предложен метод декомпозиции агрегированных элементов дисперсных образований путем маркирования исследуемых объектов.

Практическая значимость. Метод может быть использован при проектировании систем определения степени дисперсности эмульсий и других тонкоизмельченных сред.

Ключевые слова: агрегат, дисперсные образования, сегментация, диаграмма Вороного, маркеры, степень перекрытия

Введение. Эмульсии, как и другие тонкоизмельченные материалы, являются, как правило, полидисперсными системами, содержащими как отдельные

частицы, так и совокупности агрегированных образований, что существенно затрудняет анализ дисперсности и может приводить к ошибкам в определении размеров частиц и законов их распределения.

Размер частиц является важнейшей характеристикой дисперсий, в значительной степени определяющей их свойства [1]. Определение степени дисперсности как основного показателя их качества является актуальной задачей [2, 3]. В настоящее время наиболее перспективным из существующих методов является метод микроскопирования, который дает принципиальную возможность изучения геометрии отдельной частицы и позволяет формализовать процесс исследования.

Постановка задачи. Одной из основных проблем сегментации и измерения частиц системами машинного видения является агрегирование. Решению проблемы сегментации агрегатов посвящены работы [4, 5], в которых предложены различные подходы к решению этой задачи, такие как анализ геометрии всей области, исследование кривизны границы агрегата, анализ сегментов, движущихся с разными скоростями, использование морфологических подходов, пороговой сегментации с применением теории графов. Излишняя детализация объектов, чувствительность к шумам изображения, а также невозможность определения с достаточной точностью положения точек касания для агрегатов, состоящих из большого числа частиц, затрудняют их практическое использование. В [6] автором рассматривается декомпозиция агрегатов, основанная на построении их скелета. Отдельной проблемой является сегментация структур с малым дефектом выпуклости, образованных большим числом частиц. В этом случае рассматриваемые методы часто являются неэффективными ввиду отсутствия выраженных минимумов функции ширины агрегата [6] и какой-либо информации о контурах его внутренних частиц. Одним из подходов, позволяющих решить указанную проблему, является маркирование анализируемых объектов – установка своего рода меток для каждой из частиц агрегата [7]. В случае обработки изображений эмульсий типа вода-масло такими маркерами могут выступать световые блики на поверхности капель.

Целью данной работы является создание на основе упомянутых исследований метода сегментации агрегированных элементов дисперсных образований сферической формы (капель эмульсий), позволяющего обрабатывать агрегаты, содержащие внутренние объекты, контур которых располагается целиком внутри агрегата, без ограничений на число входящих частиц, а также без использования понятия „дефицит выпуклости агрегата“, что дает возможность обрабатывать агрегаты сложной конфигурации.

Методы решения. На первом этапе осуществляется фильтрация изображения, определение порогового значения яркости T_0 методом Оцу и перевод изображения в монохромный режим, после чего осуществляется определение координат точек контура агрегата.

Для изображений дисперсных образований характерны зашумленность фона, неоднородность освещения и низкая контрастность. Ввиду наличия указанных проблем далеко не всегда удается подобрать

пороговое значение таким образом, чтобы избежать разрывов границ объектов при бинаризации изображения (рис. 1), в связи с чем целесообразно провести коррекцию контуров выделенных агрегатов.

Для этого определяем минимальную прямоугольную область изображения, содержащую объект, и определяем пороговое значение яркости T_1 выделенной области. Считаем, что контур подлежит корректровке при выполнении условий

$$T_1 > T_0 ; \quad (1)$$

$$\left| \frac{T_1 - T_0}{T_0} \right| < 0,2 . \quad (2)$$

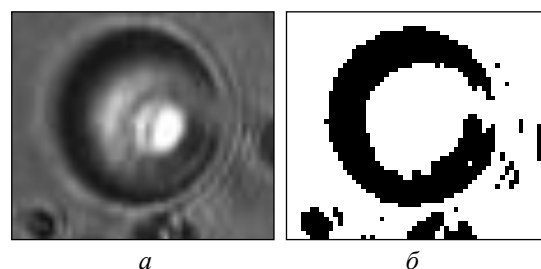


Рис. 1. Разрыв контура капли воды в масле при бинаризации изображения: а – исходное изображение; б – монохромное изображение

Условие (1) (локальное пороговое значение яркости для заданного объекта превышает общее пороговое значение для всего изображения) позволяет утолстить контур за счет возможного присоединения к нему пикселей с яркостью в интервале $(T_0, T_1]$. В случае же несоблюдения этого условия возможно появление разрывов контура. Условие (2) предотвращает излишнее утолщение контура за счет присоединения фоновых шумов. Для удаления шумов, возникших при сегментации по новому пороговому значению (объекты 1–4 на рис. 2), поступим следующим образом.

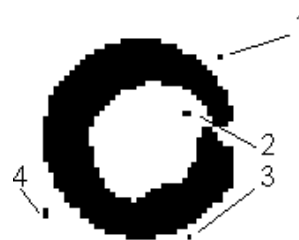


Рис. 2. Корректировка контура капли воды в масле: 1–4 – шумы

Воспользовавшись алгоритмом заливки областей с затравкой [8] (в качестве затравки можно использовать любую точку контура фигуры), зальем агрегат контрастным цветом. Упомянутый алгоритм заливки окрасит только связную область, содержащую инициализирующую точку. Таким образом, области, не отно-

сящие к агрегату, могут быть удалены по цветовому признаку (как не окрасившиеся цветом, которым помечен агрегат).

Считаем контур агрегата скорректированным успешно при выполнении хотя бы одного из условий

$$P_1 < P_0; \quad (3)$$

$$\left| \frac{P_1 - P_0}{P_0} \right| < 0,1, \quad (4)$$

где P_0 – периметр фигуры, измеренный при сегментации по пороговому значению яркости T_0 ; P_1 – периметр при пороговом значении яркости T_1 .

Условие (3) направлено на устранение разрывов контуров капель вследствие неоднородности освещения. После проведения повторной сегментации периметр, согласно (3), не увеличивается, что позволяет скорректировать, например, такой распространенный дефект сегментации контуров как „превращение“ круга (контур капли) в полумесяц (рис. 1), периметр которого значительно превышает периметр соответствующего круга (рис. 3).

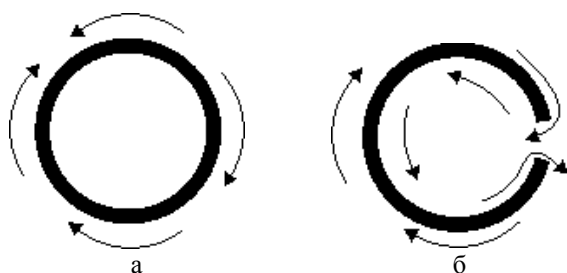


Рис. 3. Сравнение схем обхода контура идеальной частицы и частицы с разрывом контура: а – исходная частица; б – частица с дефектом контура

Условие (4) ограничивает рост периметра, что позволяет избежать присоединения площадей объектов, не относящихся к агрегату.

В результате обработки капли на рис. 1, контур которой на монохромном изображении имеет разрыв, этот недостаток устранен (рис. 4).

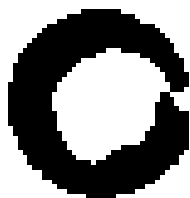


Рис. 4. Результирующее изображение капли, изображенной на рис. 1, а

Следующим шагом является расстановка маркеров для частиц, образующих агрегат. Маркирование объектов часто используется при сегментации сложных

структур. Под маркером будем понимать связанное множество пикселей, расположенных, приблизительно, в центре каждой частицы [7]. Изображения эмульсий типа вода-масло представляют собой множество капель, имеющих форму окружностей, и их агрегаты, ограниченные темным контуром на более светлом фоне (рис. 5). На поверхности капель, в большинстве случаев, располагаются световые блики, которые логично использовать в качестве маркеров частиц, что удобно для сегментации агрегатов, содержащих внутренние частицы, то есть такие частицы, все точки контура которых являются внутренними точками агрегата и не входят в список точек его контура. Будем располагать маркеры в центрах бликов.

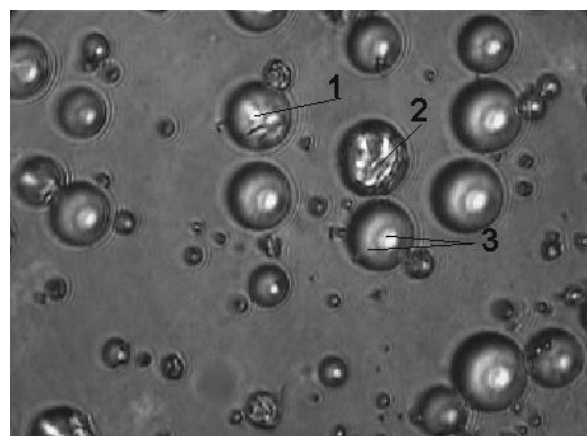


Рис. 5. Изображение эмульсии типа вода-масло: 1–3 – оптические эффекты при прохождении света через каплю

Ввиду особенностей освещения, наличия шумов изображения, а также неоднородной структуры вещества капли, вследствие включения инородных объектов (мусора, волокнистых образований в веществе и т.д.), возможно получение различных оптических эффектов при прохождении света через каплю. Блики могут иметь самый различный вид: концентрических окружностей, совокупности множества мелких светлых пятен и т.д. (рис. 5, блики на каплях 1–3). Для того чтобы использовать блик в качестве маркера, нужно не допустить декомпозиции блика. Для этого целесообразно отфильтровать фрагмент исходного изображения, содержащий агрегат, низкочастотным фильтром. После перевода отфильтрованного изображения в монохромный режим определяем контуры световых пятен в агрегате. В качестве маркеров выбираем их центры (рис. 6).

Информацией о маркерах, каждый из которых соответствует капле, входящей в состав агрегата, целесообразно дополнить процедуру декомпозиции агрегатов [6], основанную на знании структуры и контура агрегата, построении его скелета. Так, если агрегат или его фрагмент содержат только один маркер, можно говорить о наличии в нем одной капли, центр и радиус которой можно рассчитать, исходя из ее площади и координат точек контура.

Наличие нескольких бликов свидетельствует о наличии нескольких капель, площадь агрегата между которыми может быть распределена согласно диаграмме Вороного.

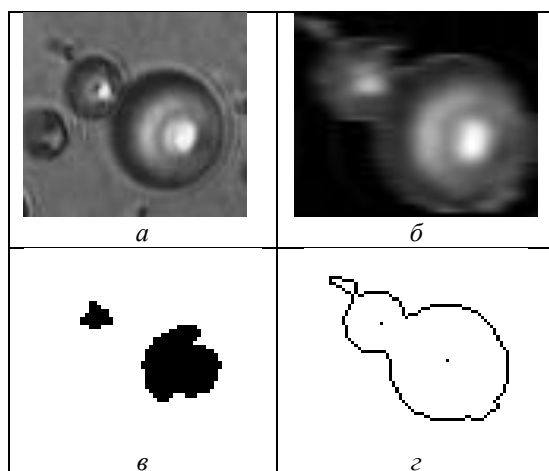


Рис. 6. Расстановка маркеров частиц: а – изображение водомасляной эмульсии; б – результат фильтрации агрегата; в – световые пятна на поверхности капель (инверсия); г – агрегат с расставленными маркерами

Существует множество алгоритмов построения диаграммы Вороного, среди которых следует отметить алгоритм Форчуна, основанный на применении заматающей прямой, рекурсивный алгоритм, основная идея которого заключается в использовании динамического программирования, алгоритм Ли, основанный на стратегии „разделяй и властвуй“. Известные алгоритмы, в большинстве своем, характеризуются высокой вычислительной и алгоритмической сложностью. Выполним построение диаграммы Вороного для множества точечных маркеров в невыпуклой области, воспользовавшись так называемым простым алгоритмом [9], идея которого заключается в поочередном построении многоугольников, входящих в диаграмму.

Для каждого маркера M_i ($i = \overline{1, l}$) с координатами (x_i, y_i) из множества маркеров M агрегата построим ячейку диаграммы Вороного следующим образом. Последовательно перебирая точки множества M , построим серединные перпендикуляры к каждому из отрезков $M_i M_j$ ($j = \overline{1, l}; j \neq i$) и определим множество \bar{P} точек их взаимопересечения. В процессе построения ячейки для маркера M_1 , проиллюстрированном на рис. 7, получим $P = \{P_1, P_2, P_3\}$.

Дополним указанное множество точками пересечения перпендикуляров с границей области (точками $P_4 - P_9$). На следующем этапе из точек множества \bar{P} исключаем те, которые не принадлежат анализируемой области (точку P_2). Среди оставшихся K точек выделяем такие, которые находятся в одной полуплоскости с маркером M_i относительно всех построен-

ных перпендикуляров. Для этого для каждой точки P_k ($k = \overline{1, K}$) множества \bar{P} строим отрезок $M_i P_k$ и определяем точку $Q_{k,j}$ его пересечения с каждым из построенных серединных перпендикуляров. Тогда точка P_k находится в одной полуплоскости с точкой M_i относительно рассматриваемого j -го перпендикуляра при выполнении хотя бы одного из условий

$$\begin{aligned} Q_{k,j} &\notin M_i P_k; \\ Q_{k,j} &\equiv P_k. \end{aligned} \quad (5)$$

Проверяем условия (5) для каждого из построенных перпендикуляров. Точка P_k ($k = \overline{1, K}$), для которой группа условий (5) нарушается в случае хотя бы одного перпендикуляра, исключается из множества \bar{P} . В итоге для маркера M_1 на рис. 7 $P = \{P_1, P_4, P_9\}$.

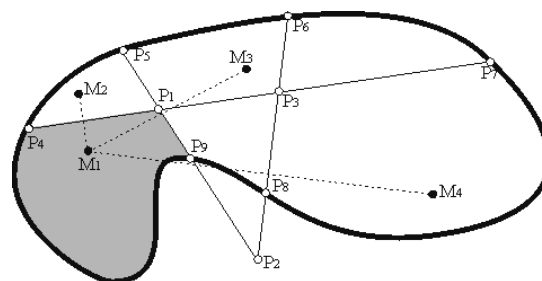


Рис. 7. Схема построения ячейки диаграммы Вороного в заданной невыпуклой области для маркера M_1 : $M_1 - M_4$ – маркер; $P_1 - P_9$ – вспомогательные точки; серый цвет – построенная ячейка

Рассмотрим точки множества \bar{P} в полярной системе координат, полюсом которой является рассматриваемый маркер M_i , упорядочим их по возрастанию полярного угла, после чего переходим к формированию контура ячейки, последовательно перебирая пары точек упорядоченного множества \bar{P} : P_1, P_2 ; P_2, P_3 ; ...; P_{K-1}, P_K ; P_K, P_1 . Если хотя бы одна из точек рассматриваемой пары является пересечением двух перпендикуляров, добавляем в список точек контура ячейки отрезок, соединяющий эти точки. Если же обе точки являются пересечением перпендикуляра с границей области, добавляем в список точек контура ячейки участок границы между этими точками.

Так, в примере построения ячейки диаграммы Вороного для маркера M_1 , рассматриваемом на рис. 7, будем анализировать следующие пары точек множества \bar{P} : P_1, P_4 ; P_4, P_9 ; P_9, P_1 . Ввиду того, что P_1 – точка пересечения двух перпендикуляров, а P_4 и P_9 – точки контура объекта, контур ячейки маркера M_1 будет состоять из следующих сегментов отрезков P_1, P_4 + кривая P_4, P_9 + отрезок P_9, P_1 .

Для растеризации отрезков – представления их в виде набора точек, можно воспользоваться любым из алгоритмов построения отрезков. Автором был использован алгоритм Брезенхема.

Аналогичным образом строим ячейки для каждого маркера.

Таким образом, площадь агрегата оказывается распределенной между всеми входящими в него частицами, каждой частице соответствует ячейка диаграммы. По координатам точек контуров ячейки (x_n, y_n) , $n = \overline{1, N}$, вычисляем для каждой из ячеек площадь S и периметр P . Радиус каждой частицы определяем как

$$R = (R_1 + R_2)/2,$$

где $R_1 = \sqrt{S/\pi}$, $R_2 = P/2\pi$ – радиусы окружностей, соответственно, той же площади и периметра, что и ячейка диаграммы Вороного, соответствующие частице. Центр частицы

$$x_c = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x_n}{N}; \quad y_c = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} y_n}{N}.$$

Окружности, соответствующие контурам капель, составляющих агрегат, могут быть восстановлены по известным параметрам.

На рис. 8 проиллюстрирована обработка модельного агрегата, состоящего из двух сферических частиц одинакового радиуса. Точность разделения агрегата оценивалась как относительная погрешность определения радиусов составляющих его кругов

$$\varepsilon = \frac{|R - R'|}{R} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где R – точное значение радиуса частиц; R' – значение радиуса, определенное при декомпозиции агрегата. На рис. 9 приведена функция, выражающая зависимость точности разделения агрегата от степени перекрытия составляющих его объектов. Степень перекрытия объектов определялась как

$$D = 2 - \frac{C_1 - C_2}{R},$$

где C_1, C_2 – координаты центров частиц.

Как видно на рис. 9, погрешность разделения возрастает с увеличением степени перекрытия частиц. Наиболее точно ($\varepsilon = 0,35\%$) задача решается в случае касания частиц ($D = 0$). По мере сближения частиц ошибка нарастает, при $D = 1,9$ $\varepsilon = 22,5\%$.

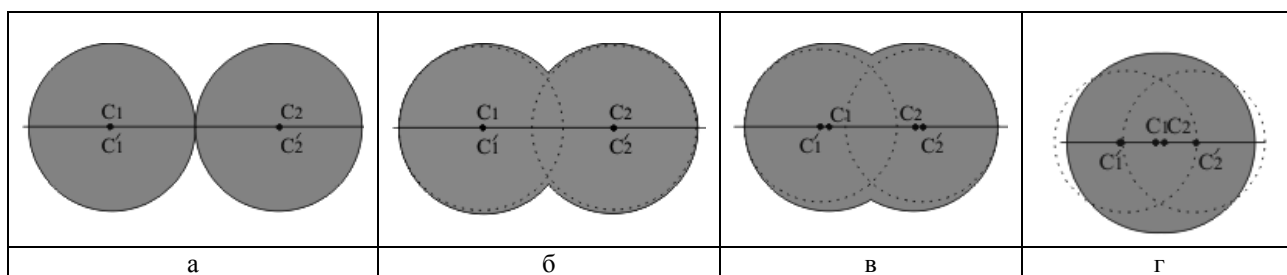


Рис. 8. Изменение перекрытия объектов модельного агрегата для оценки точности его разделения: а – $C_1C_2 = 2R, D = 0$; б – $C_1C_2 = 1,5R, D = 0,5$; в – $C_1C_2 = R, D = 1$; г – $C_1C_2 = 0,1R, D = 1,9$; C_1, C_2 – истинные центры окружностей, C'_1, C'_2 – центры восстановленных окружностей; R – радиус окружностей; _____ – контур агрегата; – контуры восстановленных окружностей

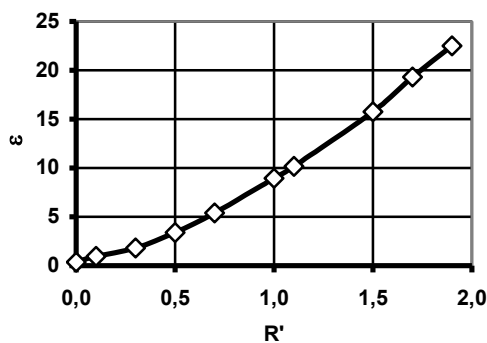


Рис. 9. Зависимость точности разделения модельного агрегата на рис. 8 от степени перекрытия составляющих его объектов

Таким образом, метод позволяет идентифицировать рассматриваемый агрегат как две слипшиеся частицы даже при высокой степени их перекрытия ($D = 1,9$). В то же время метод декомпозиции [6], основанный на анализе структуры агрегатов, неприменим при высоких степенях перекрытия частиц.

В то же время использование диаграммы Вороного для распределения площади агрегата между частицами имеет и свои недостатки. Указанный метод дает удовлетворительные результаты в случае, когда частицы имеют приблизительно одинаковые размеры.

Описанный метод разделения агрегатов проиллюстрирован на примере обработки изображения модельного агрегата, состоящего из 19 сферических частиц одинакового радиуса (рис. 10).

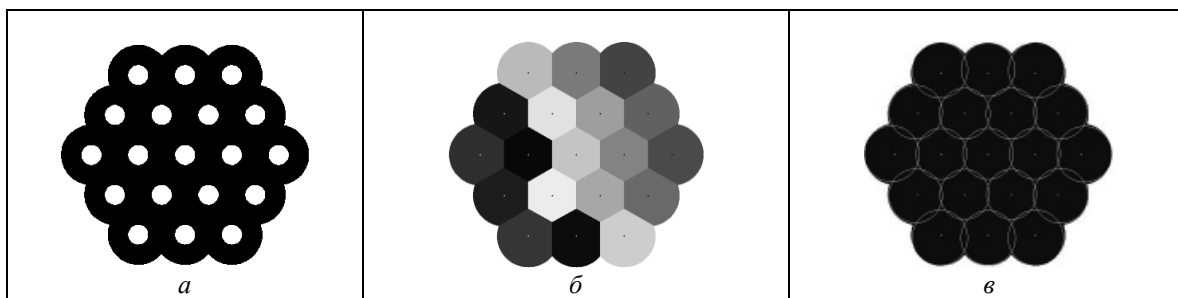


Рис. 10. Декомпозиція модельного агрегата: а – исходное изображение; б – разделение площади агрегата при помощи диаграммы Вороного; в – результирующее изображение; точками обозначены маркеры частиц

Указанный пример иллюстрирует случай наличия в агрегате внутренних объектов – объектов, контур которых целиком лежит внутри агрегата и не является частью его контура. Точность декомпозиции указанного образования – 10%.

На рис. 11 приведен фрагмент агрегата реального дисперсного образования – эмульсии второго рода (вода в масле), и результат его декомпозиции.

На некоторых каплях агрегата могут отсутствовать блики, что также может приводить к погрешностям сегментации агрегата (капли 1 и 2 на рис. 11). Вследствие указанных особенностей, целесообразным является дополнение данного подхода методом сегментации агрегатов, основанным на анализе их структуры, изложенным в работе [6].

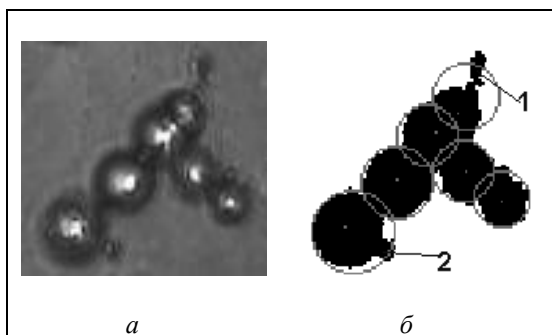


Рис. 11. Декомпозиция фрагмента изображения эмульсии второго рода (вода в масле): а – исходное изображение; б – результирующее изображение; точками обозначены маркеры частиц; 1, 2 – немаркированные капли

Выводы. Наличие агрегированных образований является одной из основных проблем, возникающих при определении степени дисперсности эмульсий и других тонкоизмельченных материалов.

Автором разработан метод сегментации агрегированных элементов дисперсных образований с низким дефектом выпуклости, а также агрегатов, содержащих внутренние объекты, контур которых целиком лежит внутри агрегата и не является частью его контура.

Метод включает следующие этапы: фильтрация изображения и перевод его в монохромный режим, корректировка контуров, расстановка маркеров частиц по бликам на их поверхности, распределение

площади агрегата между входящими в него частицами и определение центра и радиуса частиц по занимаемой площади.

Работа метода проиллюстрирована как на модельных изображениях, так и на фрагментах изображений реальных эмульсий второго рода (вода в масле).

Предложенный метод позволяет осуществлять разделение агрегированных элементов дисперсных образований, состоящих из частиц сферической формы (капель эмульсий), без ограничений на число входящих частиц, а также без использования понятия „дефицит выпуклости агрегата“.

Метод может быть использован при проектировании систем определения степени дисперсности эмульсий и других тонкоизмельченных сред.

Список литературы / References

1. Оценка связности дисперсного материала из агрегированных частиц / М.В. Василевский, К.В. Некрасова, А.С. Разва, Е.Г. Зыков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – т. 75. – № 5. – С. 32–36.
Vasylevskiy, M.V., Nekrasova, K.V., Razva A.S. and Zykov, Ye.G. (2009), “Cohesion estimation of dispersed material of aggregated particles”, *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov*, Vol. 75, no. 5, pp. 32–36.
2. Дубровский В.В. Определение дисперсного состава капель при распыливании жидкости из центробежной форсунки / В.В. Дубровский, А.М. Подвысоцкий, А.И. Баштовой // Технологія і техніка друкарства. – 2004. – № 2–3(4–5). – С. 94–99.
Dubrovskiy, V.V., Podisotskiy, A.M. and Bash-tovoy, A.I. (2004), “Drops dispersity evaluation when liquid spraying out of centrifugal nozzle”, *Tehnologiya i tehnika drukarstva*, no. 2–3(4–5), pp. 94–99.
3. Ударцева О.В. Определения дисперсности аэрозольных пестицидов методом пьезорезонансного микровзвешивания / О.В. Ударцева // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12. – С. 383–384.
Udartseva, O.V. (2011), “Determining aerosol dispersion of pesticides by piezoresonance microweighing”, *Fundamentalnyye issledovaniya*, no. 12, pp. 383–384.
4. Honkanen, M. (2007), “Analysis of the overlapping images of irregularly-shaped particles, bubbles and droplets”, *papers of International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany*, pp. 370–382.
5. Kutalik, Z., Razaz, M. and Baranyi J. (2004), “Occluding convex image segmentation for e.coli microscopy

images” papers of the XII European Signal Processing Conference EUSIPCO, Vienna, pp. 937–940.

6. Декомпозиция изображений агрегированных элементов дисперсных образований по их структуре / Т.А. Рузова, А.П. Толстопят, В.И. Елисейев, Л.А. Флер // Научный вестник Национального горничного университета. – 2013. – № 6. – С. 117–124.

Ruzova, T.A., Tolstopyat, A.P., Yeliseyev, V.I. and Fleer, L.A. (2013), “Images decomposition of aggregated elements in dispersive formations by their structure”, *Naukovyj visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, Dnipropetrovsk, no. 6, pp. 117–124.

7. Adiga, P.S.U., Malladi, R., Baxter, W. and Glaeser, R.M. (2004), “A binary segmentation approach for boxing ribosome particles in cryo EM micrographs”, *Journal of Structural Biology*, Vol. 145, Issue: 1–2, pp. 142–151.

8. Алгоритмические основы растровой машинной графики / [Д.В. Иванов, А.С. Карпов, Е.П. Кузьмин и др.] // Бином. Лаборатория Знаний, Интернет-Университет Информационных Технологий – 2007. – 283 с.

Ivanov, D.V., Karpov, A.S., Kyzmin, Ye.P., Lempitskiy, V.S. and Khropov A.A., (2007), *Algoritmicheskie osnovy rastrovoy mashinnoy grafiki* [Algorithmic foundations of raster computer graphics], Binom. Laboratoriya Znaniy, Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologiy, Russia.

9. Карабцев С.Н. Построение диаграммы Вороного и определение границ области в методе естественных соседей / С.Н. Карабцев, С.В. Стуков // Вычислительные технологии. – 2008. – т. 13. – № 3. – С. 65–81

Karabtsev, S.N. and Stukov, S.V. (2008), “The Voronoy diagram making and determinating area boundary at natural neighbors method”, *Vychislitelniye texnologii*, Vol. 13, no. 3, pp. 65–81.

Наявність агрегованих утворень є однією з основних проблем, що виникають при визначенні ступеня дисперсності емульсій та інших тонкоподрібнених матеріалів.

Мета. Створення методу сегментації агрегованих елементів дисперсних утворень сферичної форми, що дозволяє обробляти агрегати, які містять внутрішні об’єкти, контур яких розташовується цілком усередині агрегату, без обмежень на число вхідних часток, а також без використання поняття „дефіцит опуклості агрегату“, що дає можливість обробляти агрегати складної конфігурації.

Методика. Розроблений метод включає наступні етапи: фільтрація зображення й переведення його в монохромний режим, визначення координат точок контуру агрегату, коректування контуру для усунення можливих розривів границь при бінаризації зображення, розміщення маркерів частинок за відблисками на їх поверхні, розподіл площі агрегату між частинками, що входять до його складу, відповідно до діаграми Вороного. Центри й радіуси частинок визначалися за площею відповідної комірки діаграми.

Робота методу проілюстрована на модельних агрегатах. Наведений графік залежності точності розділення агрегату від ступеня перекриття об’єктів, що входять до

його складу. Проілюстрована також обробка агрегату у випадку наявності у ньому внутрішніх об’єктів. Наведений приклад обробки фрагмента зображення реальної емульсії другого роду (вода в маслі).

Результати. Запропонований метод дозволяє здійснювати розділення агрегованих елементів дисперсних утворень, що складаються з частинок сферичної форми (крапель емульсії).

Наукова новизна. Запропонований метод декомпозиції агрегованих елементів дисперсних утворень шляхом маркування досліджуваних об’єктів.

Практична значимість. Метод може бути використаний при проектуванні систем визначення ступеня дисперсності емульсій та інших тонкоподрібнених середовищ.

Ключові слова: агрегат, дисперсні утворення, сегментація, діаграма Вороного, маркери, ступінь перекриття

The presence of aggregated structures is one of the main problems arising in determining dispersion degree of emulsions and other fine-grained materials.

Purpose. To create a method for segmentation of aggregated structures of spherical particles in dispersive formations, allowing us to process aggregates including internal objects, which contours are located entirely within the aggregate; without restrictions on components number; and without using the concept of aggregate convexity deficit; it makes it possible to process units of complex configuration.

Methodology. The new method includes several steps: filtering the image and converting it to monochrome mode; evaluating coordinates of aggregate’s boundary points; contour correcting to eliminate possible contour discontinuities at image binarization; particles markers setting according to glares on particles surfaces; and aggregate’s area distribution between the forming particles according to the Voronoy diagram. Particles centers and radii are determined by the area of corresponding diagram cell.

Method operation was illustrated on model aggregates. We presented the graphic of dependence of aggregate separation accuracy on components overlap degree. The processing of aggregates in case of internal objects was also illustrated. We showed an example of processing of the image fragment of real emulsion type II (water in oil).

Findings. The method allows segmentation of aggregated structures of spherical particles (emulsion drops) in dispersive formations.

Originality. We have designed the method for aggregated elements of dispersed formations decomposition by means of investigated objects marking.

Practical value. The method may be used to design systems for measuring dispersion degree of emulsions and other fine-grained mediums.

Keywords: aggregate, dispersed formation, segmentation, the Voronoy diagram, markers, overlap degree

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсуном. Дата надходження рукопису 18.06.13.