

УДК 661.13

## ИЗМЕНЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ В АППАРАТЕ РОТОРНОГО ТИПА

<sup>1</sup>Сидоров В.Н., <sup>2</sup>Ширина Н.Ю., <sup>3</sup>Мурашов А.А.

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, e-mail: s\_sidorov@me.com;

<sup>2</sup>Ярославский государственный медицинский университет,  
Ярославль, e-mail: shirina-natasha@mail.ru;

<sup>3</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,  
Ярославль, e-mail: yavzru\_pvo@mail.ru

В статье рассматривается изменение дисперсного состава твердых частиц двуокиси титана на процесс диспергирования в водном растворе с твердыми частицами кальцита. При этом использовались более мелкие частицы двуокиси титана (средний размер частиц равен 0,2 мкм) и более крупные (средний размер частиц равен 0,9 мкм). Средний размер используемых частиц кальцита составляет 6,4 мкм. Процесс диспергирования осуществляется в аппарате роторного типа. С помощью микроскопического метода построены гистограммы распределения твердых частиц по размерам до и после диспергирования. В качестве статистической оценки размера частиц использовалась длина проекции частиц на произвольно выбранное направление (диаметр Ферет). При использовании более мелких частиц двуокиси титана происходит размывание дисперсного состава по всему интервалу размеров твердых частиц и при этом средний размер частиц увеличивается почти в три раза. Для крупных частиц двуокиси титана средний размер частиц практически не изменяется. Также в процессе диспергирования сокращается доля мелких частиц кальцита, размер которых меньше 8,4 мкм, и средний размер частиц увеличивается в 1,5 раза. Анализ результатов исследований показывает, что при использовании более крупной фракции частиц двуокиси титана в процессе диспергирования наблюдается более равномерный дисперсный состав, что препятствует расслоению частиц суспензии. Также было изучено распределение частиц по массе. Результаты исследований показывают, что оно имеет менее выраженный характер неоднородности при использовании как мелких, так и крупных частиц двуокиси титана.

**Ключевые слова:** твердые частицы, диспергирование, дисперсный состав, оптический метод, распределение по размерам, закон распределения

## MODIFICATION OF SOLID PARTICLES DISPERSE COMPOSITION DURING DISPERSION IN A ROTARY TYPE DEVICE

<sup>1</sup>Sidorov V.N., <sup>2</sup>Shirina N.Yu., <sup>3</sup>Murashov A.A.

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, e-mail: s\_sidorov@me.com;

<sup>2</sup>Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, e-mail: shirina-natasha@mail.ru;

<sup>3</sup>Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, e-mail: yavzru\_pvo@mail.ru

The article discusses the change in the dispersed composition of solid particles of titanium dioxide in the dispersion process in an water solution with solid particles of calcite. The smaller titanium dioxide particles (average particle size is 0.2 microns) and the larger particles (average particle size is 0.9 microns) are used. The average particle size of calcite is 6.4 microns. The process takes place in a rotary type device. Histogram of distribution size particle is constructed using microscopic method. Distribution histograms are constructed for two process steps such as before dispersion and after dispersion. The length of the projection of the particles on an arbitrarily chosen direction (Ferret diameter) was used to statistically estimate the particle size. Then digital processing of video images was carried out. We used ImageJ software written in Java. The research results show that when using smaller particles of titanium dioxide, the dispersion of the composition erodes over the entire size range of solid particles. The average particle size of the dispersion is three times larger than the average particle size before dispersion. For large titanium dioxide particles, the average particle size remains almost unchanged. Also in the dispersion process, the proportion of small particles of calcite (size less than 8.4 microns) is reduced and the average particle size increases 1.5 times. Analysis of the research results shows that when using a larger fraction of titanium dioxide particles in the dispersion process, a more uniform dispersed composition is observed, which prevents stratification of suspension particles. The particle mass distribution was also studied. It has a less pronounced heterogeneity when using both small and large particles of titanium dioxide.

**Keywords:** solid particle, dispersion, disperse composition, optical method, distribution size particle, partition law

В лакокрасочной промышленности широко используются процессы диспергирования твердых частиц в жидкости. При этом применяются различные дисперсные составы твердых частиц, для определения которых наиболее распространен оптический метод [1].

В данной работе рассматривается диспергирование твердых частиц кальцита и двуокиси титана в водном растворе. При этом могут использоваться более мелкие и более крупные частицы двуокиси титана. В первом случае стоимость материала существенно выше, чем во втором. Вслед-

ствии этого возникает необходимость изучения процесса диспергирования с различными размерами частиц двуокиси титана.

Цель исследования: изучение влияния дисперсного состава твердых частиц двуокиси титана на процесс диспергирования в водном растворе с твердыми частицами кальцита. Процесс осуществляется в аппарате роторного типа [2]. С помощью микроскопического метода определяются распределения твердых частиц по размерам до и после диспергирования. В качестве статистической оценки размера частиц использовался диаметр Ферет [1].

### Материалы и методы исследования

Основным элементом оптического метода является цифровая обработка видеоизображения [3]. В данных исследованиях использовалось программное обеспечение ImageJ, распространяемое без лицензионных ограничений как общественное достояние. Для контрастирования исходного изображения использовался метод медианной фильтрации (Intermodes) [4]. Преобразование изображений из многоцветных в бинарные осуществлялось по задаваемому порогу яркости [5]. Для поиска и измерения частиц используется алгоритм прослеживания контуров [4].

Микроскопический метод определения гранулометрического состава дисперсной системы основан на рассмотрении отчетливо видимых частиц сильно разбавленного раствора на микрофотографии, полученной с помощью оптического микроскопа. Частицы суспензии не имеют правильной геометрической формы, поэтому в работе в качестве размера твердых частиц определялся не линейный размер частиц, а диаметр Феррет. Диаметр Феррет – это длина проекции изображения частицы на прямую в заданном направлении, измеряемая как расстояние между касательными к контуру изображения, проведенными параллельно выбранному направлению.

Для подготовки суспензии необходимо выполнить тщательное перемешивание препарата для исключения агрегирования частиц. Капля пробы переносится на предметное стекло, покровное стекло прижимается к образцу для образования монослоя частиц в препарате. Полученные изображения снимались при помощи камеры и фотоаппарата и записывались в электронном виде. Так же снималась и микроскопическая линейка. Полученная информация затем преобразуется на компьютере в растровое изображение.

При помощи программного обеспечения выполняется следующая последовательность действий: открывается созданная фотография образца продукта и микроскопической линейки; калибровка; фильтрация (контрастирование) изображения; преобразование исходного изображения в бинарное (черно-белое); распознавание и идентификация объектов изображения; обработка краев изображения, обработка информации об объектах.

Процесс преобразования изображения в процессе изучения дисперсного состава представлен на рис. 1.

В процессе диспергирования твердых частиц в аппаратах роторного типа происходят два конкурирующих процесса: агломерация твердых частиц и их разрушение. При этом изменение дисперсного состава твердых частиц определяется в основном распределением твердых частиц по размерам до диспергирования [6]. Все опыты по диспергированию проводились в течение 20 мин.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2, а и б, представлены гистограммы распределения твердых частиц двуокиси титана до и после диспергирования для фракции со средним размером частиц 0,9 мкм.

На рис. 3, а, б, представлены гистограммы распределения твердых частиц двуокиси титана до и после диспергирования для фракции со средним размером частиц 0,2 мкм.

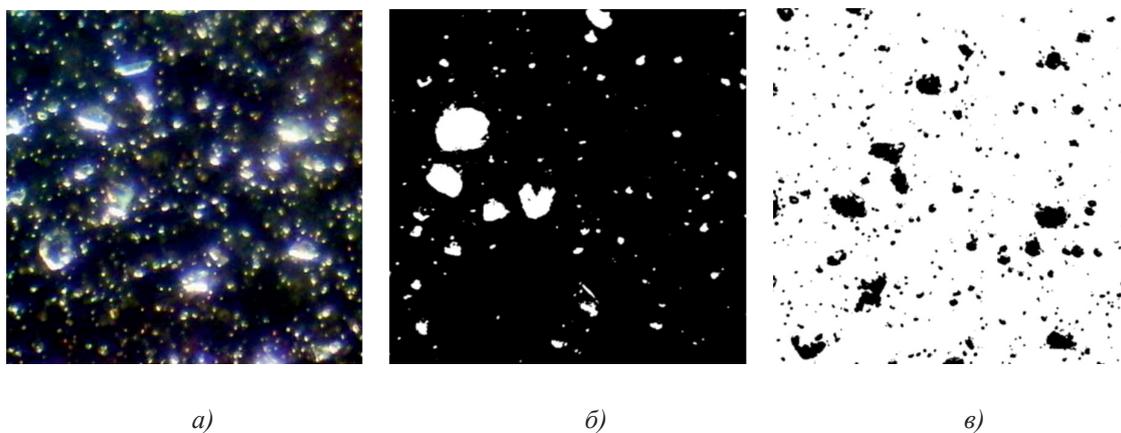


Рис. 1. Этапы работы с изображениями: а) исходное изображение; б) изображение после фильтрации; в) изображение, преобразованное в черно-белое

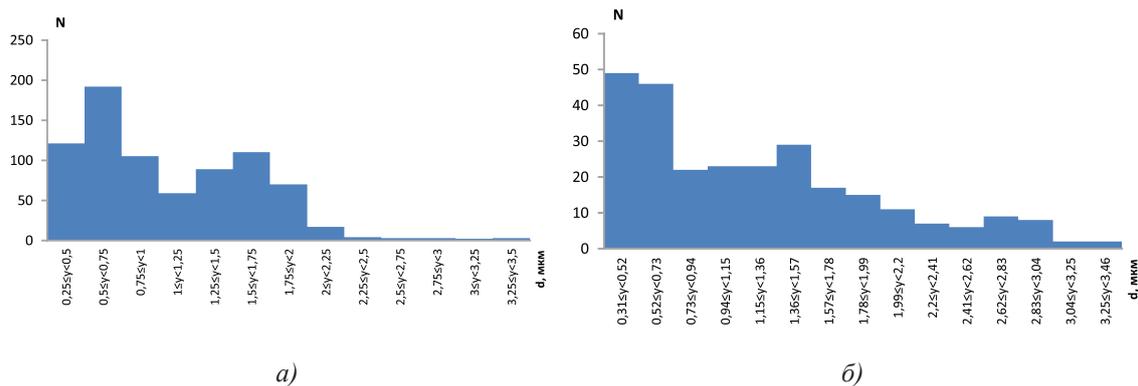


Рис. 2. Гистограммы распределения твердых частиц двуокиси титана (0,9) до (а) и после диспергирования (б)

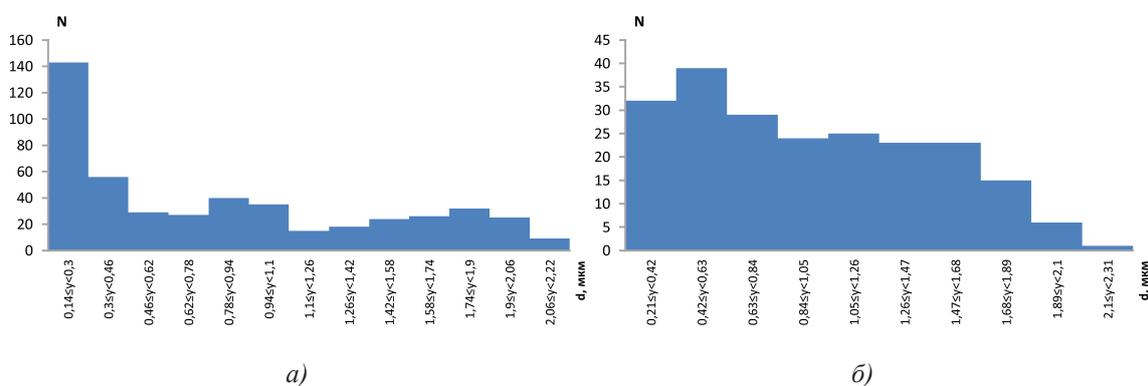


Рис. 3. Гистограммы распределения твердых частиц двуокиси титана (0,2) до (а) и после диспергирования (б)

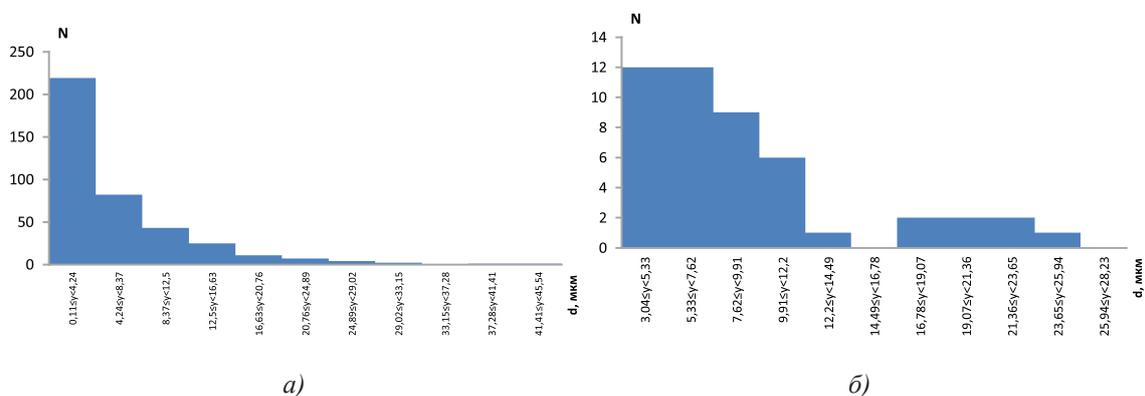


Рис. 4. Гистограммы распределения твердых частиц кальцита до (а) и после (б) процесса диспергирования

Сравнение гистограмм показывает, что при использовании более мелких частиц двуокиси титана со средним размером частиц 0,2 мкм происходит размывание дисперсного состава по всему интервалу размеров твердых частиц. Для крупных частиц двуокиси титана средний размер частиц практически не изме-

няется. В то же время для мелких частиц средний размер увеличивается почти в 3 раза.

На рис. 4, а, б, представлены гистограммы распределения твердых частиц кальцита (исходный средний размер частиц равен 6,4 мкм) по размерам до начала и после процесса диспергирования.

Сравнение гистограмм показывает, что значительно сократилась доля мелких частиц, размер которых меньше 8 мкм, вследствие их агрегации. При этом почти в 2 раза вырос средний размер частиц. Средний размер частиц определялся по формуле средневзвешенной [7]:

$$x_{cp} = \sum_{i=1}^n x_i f_i, \quad (1)$$

где  $x_i$  – средний размер частиц в  $i$ -й фракции,  $f_i$  – доля количества частиц в  $i$ -й фракции.

На рис. 5 представлено совместное распределение твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,2 мкм) по размерам.

Анализ гистограммы показывает, что мелкие частицы двуокиси титана сосредоточены в интервале частиц 0,2–1,2 мкм и практически не пересекаются с частица-

ми кальцита, что может приводить к расслаиванию суспензии.

На рис. 6 представлено совместное распределение твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,9 мкм) по размерам.

Анализ гистограммы показывает, что, как и в случае исходной мелкой фракции двуокиси титана, частицы двуокиси титана сосредоточены в интервале от 0,2 мкм до 1,2 мкм и частично пересекаются с частицами кальцита. Наблюдаемый эффект показывает, что при использовании более крупных частиц двуокиси титана наблюдается более равномерный дисперсный состав, что препятствует расслоению частиц суспензии.

В первой части настоящей работы рассмотрены данные по дисперсному составу твердых частиц двуокиси титана и кальцита в процессе диспергирования.

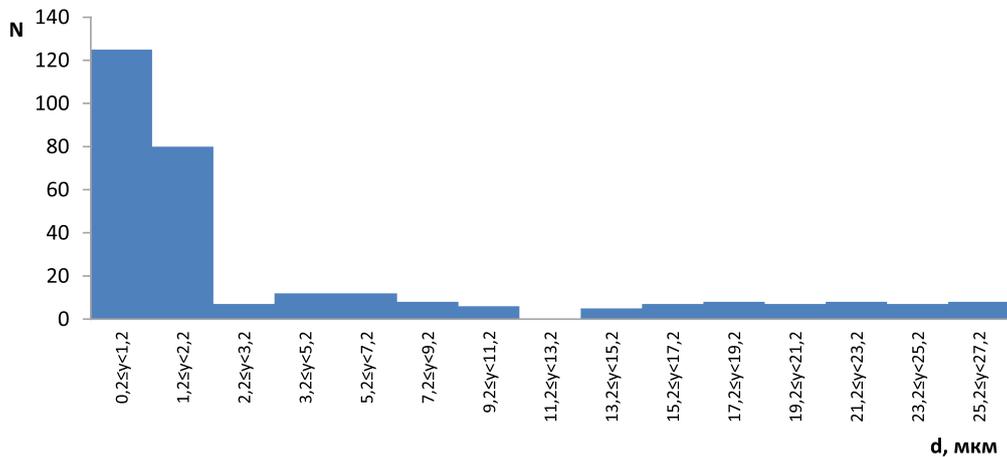


Рис. 5. Гистограммы совместного распределения твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,2 мкм)

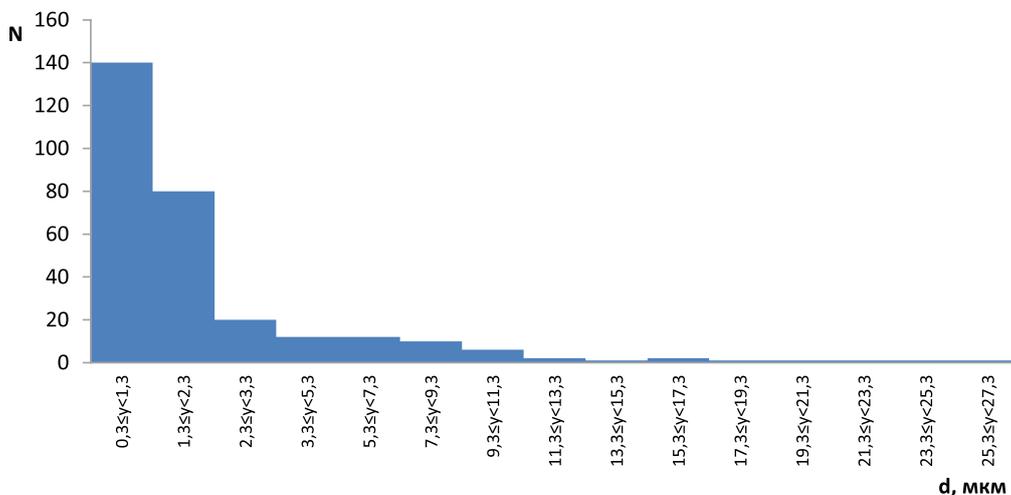


Рис. 6. Гистограммы совместного распределения твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,9 мкм)

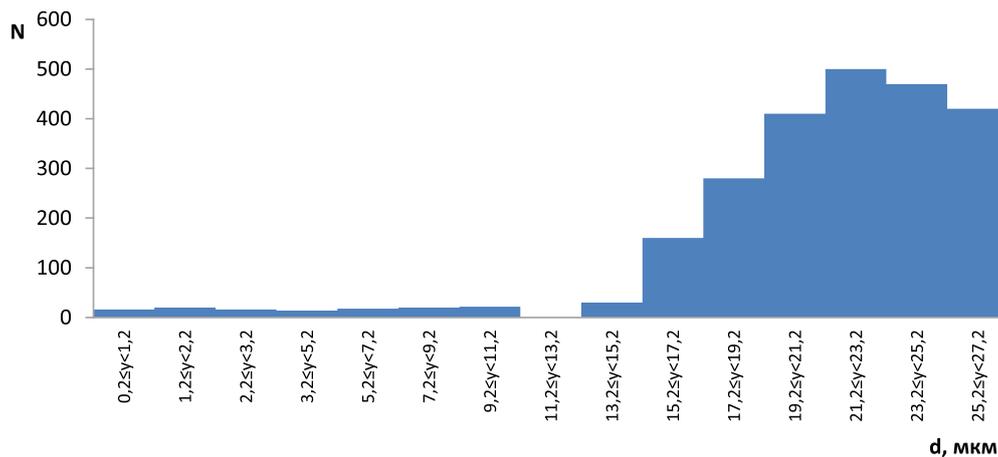


Рис. 7. Гистограммы совместного распределения твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,2 мкм) по массе

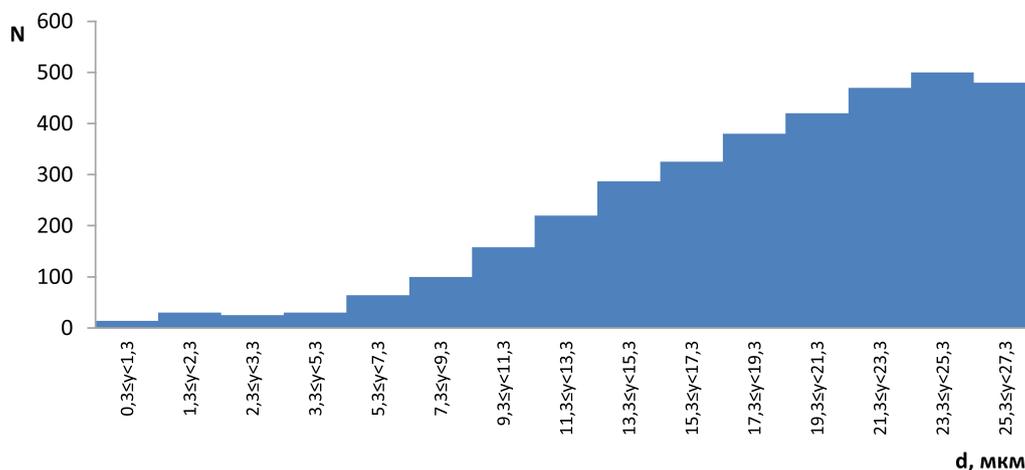


Рис. 8. Гистограммы совместного распределения твердых частиц кальцита и двуокиси титана (средний размер частиц 0,9 мкм) по массе

На практике большой интерес представляет распределение частиц по массе. При этом твердая частица считается сферической и в качестве ее диаметра берется значение диаметра Ферет. На рис. 7 и 8 представлены распределения массы частиц кальцита и двуокиси титана с заданным размером при различных средних размерах исходной фракции двуокиси титана.

Анализ приведенных данных показывает, что распределение частиц по массе имеет менее выраженный характер неоднородности. При этом имеется значительная область величины массы, где значения массы частиц кальцита и двуокиси титана практически не различимы. Эти результаты справедливы как при использовании

более мелкой (0,2 мкм), так и при использовании более крупной (0,9 мкм) фракции двуокиси титана.

#### Заключение

Показано, что при использовании более крупных частиц двуокиси титана (средний размер частиц равен 0,9 мкм) при их диспергировании в водном растворе с твердыми частицами кальцита (средний размер частиц равен 6,4 мкм) наблюдается более равномерный дисперсный состав, что препятствует расслоению частиц суспензии. Также показано, что распределение частиц по массе имеет менее выраженный характер неоднородности при использовании как мелких, так и крупных частиц двуокиси титана.

**Список литературы**

1. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012. 52 с.

2. Пат. 2534797 Российская Федерация МПК<sup>6</sup> В 01 F 7/16. Смеситель. Сидоров В.Н., Ширина Н.Ю., Козлов М.В.; заявитель и патентообладатель Ярославский госуд. техн. ун-т. № 2013121227/05; заявл. 07.05.13; опубл. 10.12.14, Бюл. № 34 3 с.

3. Азаров В.Н., Ребров В.А., Козловцева Е.Ю., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Тертишников И.В., Поляков И.В., Абухба Б.А. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. С. 92.

4. Шилов Б.Н., Энглевский Н.А. ImageJ программа для изучения медико-биологических изображений. Руководство для исследователя. М.: LAP LAMBERT AcademicPublishing, 2013. 312 с.

5. Королев Д.В., Суворов К.А. Анализ дисперсного состава микроскопических объектов с использованием ЭВМ // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-19: сб. трудов XIX Междунар. науч. конф. 2006. Т. 2. С. 6–10.

6. Ширина Н.Ю., Сидоров В.Н., Мурашов А.А. Моделирование процесса диффузии твердых частиц в циркуляционном потоке жидкости // Вестник Костромского государственного университета имени Н.А. Некрасова. 2014. Т. 20. № 5. С. 15–17.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. М.: Высшее образование, 2008. 479 с.