

УДК 57.08, 602

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ АНИЗОТРОПНЫХ ПО ФОРМЕ МИКРО- И НАНО- ЧАСТИЦ РОТАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Бунин В.В., E-mail: vadbun@mail.ru

Ивченко В.Д., д.т.н., E-mail: ivchenko@mirea.ru,
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия,

Аннотация

Использование ориентации микро- и нано- частиц в потоке Taylor-Couette за счёт гидродинамических сил представляет собой удобный, точный и простой метод определения концентрации и размеров частиц в исходной поддерживающей среде суспензии без необходимости проведения пробоподготовки [1]. При измерении параметров микробиологических частиц, особенно животных клеток, отсутствие пробоподготовки является важным фактором. Эти клетки чувствительны к любым вариациям параметров поддерживающей среды. Замена среды приводит к осмотическим процессам и агрегацией клеток, и как следствие к изменению размеров этих клеток. Для неорганических частиц использование той же поддерживающей среды предотвращает их агломерацию. Использование фотометрического сигнала релаксации частиц в хаотическое состояние для расчета размеров и концентрации, обеспечивает высокую точность измерения параметров и их статистическую достоверность.

Ключевые слова: гидродинамическая ориентация частиц, поток Taylor-Couette, сечение светорассеяния.

SIZE MEASURING OF ANISOTROPIC BY FORM MICRO - AND NANO – PARTICLES BY ROTARY-OPTICAL METHOD

Bunin Vadim V., E-mail: vadbun@mail.ru

Ivchenko Valeriy D., Dr.of Sci., E-mail: ivchenko@mirea.ru,
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Annotation

Using of micro - and nano - particles orientation in Taylor-Couette flow by hydrodynamic forces is a convenient, accurate and easy method for measurement concentration and size of the particles in the original supporting media of suspension without the need for sample preparation [1]. In case of measuring the parameters of microbiological particles, especially animal cells, lack of sample preparation is an important factor. These cells are sensitive to any variations of supportive media parameters. Replacement of the media leads to osmotic processes and aggregation of cells, and as a consequence to a change in the size of these cells. For inorganic particles using the same supportive media prevents agglomeration. Using of photometric signal of particles relaxation in a chaotic condition for the calculation of sizes and concentration, provides high accuracy of measurement and their statistical reliability.

Keywords: hydrodynamic orientation of particles, flow Taylor-Couette, light scattering cross section.

Измерение размеров микро- и нано- частиц и их концентрации являются одними из наиболее распространенных видов физических измерений при решении множества прикладных и научных задач в биотехнологии, экологии, при производстве

композитов. Для решения этой задачи впервые был использован феномен гидродинамической ориентации несферических частиц в ламинарном потоке с градиентом скорости, который носит название потока Taylor-Couette [2]. Такой поток создается между цилиндрическими поверхностями, которые вращаются с различными скоростями. Его параметры могут быть определены при решении уравнения Навье-Стокса [3], [4].

За счет градиента скоростей создается градиент давления жидкости на несферическую частицу. В любой момент времени частица, ориентированная по потоку длинной осью с минимальным в направлении градиента скорости сечением способна перемещаться и отклоняться от этого положения. Увеличение сечения при повороте и наличие градиента скорости вблизи повернувшейся частицы приводит к повышению на нее давления и возникновению вращающего момента. Частица совершает кувырок.

На рис.1 проиллюстрированы известные результаты моделирования поведения частицы в потоке Taylor-Couette при движении граничных плоскостей со скоростями v в противоположных направлениях. Интенсивность света на рисунке отражает величину давления на частицу в различных точках потока [5],[6].

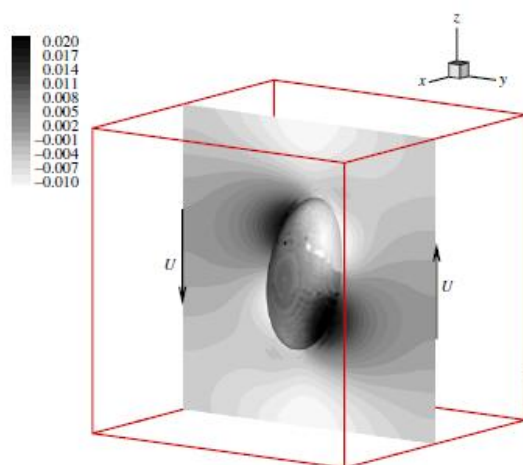


Рис.1 Моделирование поведения частицы в потоке с градиентом скорости

Решение уравнения Навье-Стокса для жидкости между соосными цилиндрическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 с угловыми скоростями соответственно Ω_1 и Ω_2 при отсутствии продольного градиента имеет простое общее решение вида r^n [4]:

$$v_\theta(r) = \frac{C_1}{r} + C_2 * r \quad (1)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{(\Omega_1 - \Omega_2)R_1^2}{1 - R_1^2/R_2^2} \quad C_2 = \frac{(\Omega_1 R_1^2 - \Omega_2 R_2^2)}{R_1^2 - R_2^2}$$

Определение степени ориентации и параметров гармонического вращения частицы является предметом отдельного рассмотрения. В данный момент практический интерес вызывает поведение гидродинамически ориентированных частиц после уравнивания угловых скоростей цилиндров.

После прекращения воздействия при уравнивании угловых скоростей соосных цилиндров, в частности при затормаживании внутреннего цилиндра при неподвижном внешнем, суспендированные частицы переходят из ориентированного состояния в хаотическое состояние. Оптические свойства среды изменяются. Наиболее просто эти изменения регистрировать как изменение усредненного по ансамблю сечения рассеяния частицы $G_s(t)$ относительно сечения хаотически ориентированной частицы - G_{s0} . В приближении слабой степени ориентации изменение оптической плотности суспензии $dD(t)$ будет связано с изменением сечения рассеяния следующим соотношением

$$dD(t) = (G_s(t) - G_{s0}) * N * \exp(-6 * D(a,b)t)$$

где $D(a,b)$ - коэффициент вращательной диффузии усредненной по размерам частицы с длиной a и поперечным размером b , N – число частиц

Так как функция изменения оптической плотности суспензии $dD(t)$ при релаксации частиц в хаотическое состояние может быть измерена, то значение $D(a,b)$ может быть рассчитано из соотношения

$$D(a,b) = K / 6 \int dD(a,b) dt \quad (2)$$

где K – константа.

В молекулярной физике имеются расчетные формулы для определения $D(a,b)$ для частиц различных форм [8]. Коэффициент вращательной диффузии эллиптических частиц рассчитывается следующим образом[9]:

$$D(a,b) = kT / \pi \eta a^3 \ln(2p - 0.5) \quad (3)$$

где η - кинематическая вязкость жидкости, $p = a/b$ – эксцентриситет частицы

Решая уравнение (3) относительно размера a , получаем:

$$a^3 = (kT / \pi \eta D(a,b)) * \ln(2p - 0.5) \quad (4)$$

Так как в большинстве случаев суспензии являются сильно разбавленными, то вариация величины вязкости суспензии η является незначительной и величина параметра равна вязкости поддерживающей среды, обычно воды.

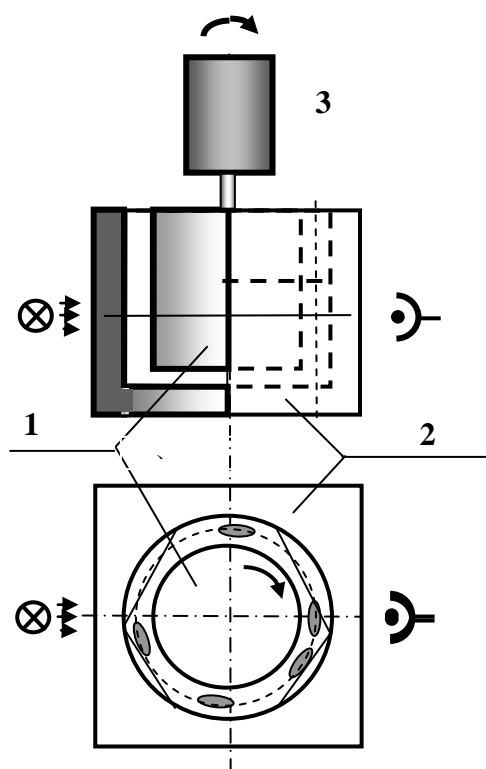


Рис.2 Схема измерительной ячейки 1- вращающийся цилиндр, 2- неподвижный цилиндр, 3- двигатель с муфтой быстрого торможения вала.

На рисунке 2 представлен чертеж измерительного устройства для определения размеров частиц при их гидродинамической ориентации.

Вращающийся и неподвижный цилиндры выполнены из прозрачного материала. Диаметры цилиндров, зазор между ними и скорость вращения внутреннего цилиндра определяют градиент скорости и степень гидродинамической ориентации частиц. Величина зазора определяет оптический путь в суспензии от источника света с длиной волны 660 nm до фотоприемника. В данной измерительной схеме производится определение изменений оптической плотности суспензии. Так как для биологических частиц поглощение света в видимом свете отсутствует, то изменение величины оптической плотности линейно связано с изменением сечения рассеяния усредненной частицы и их концентрацией.

Конструкция прибора для выполнения измерений размеров частиц дополнена рядом вспомогательных узлов и показана на рисунке. 3.

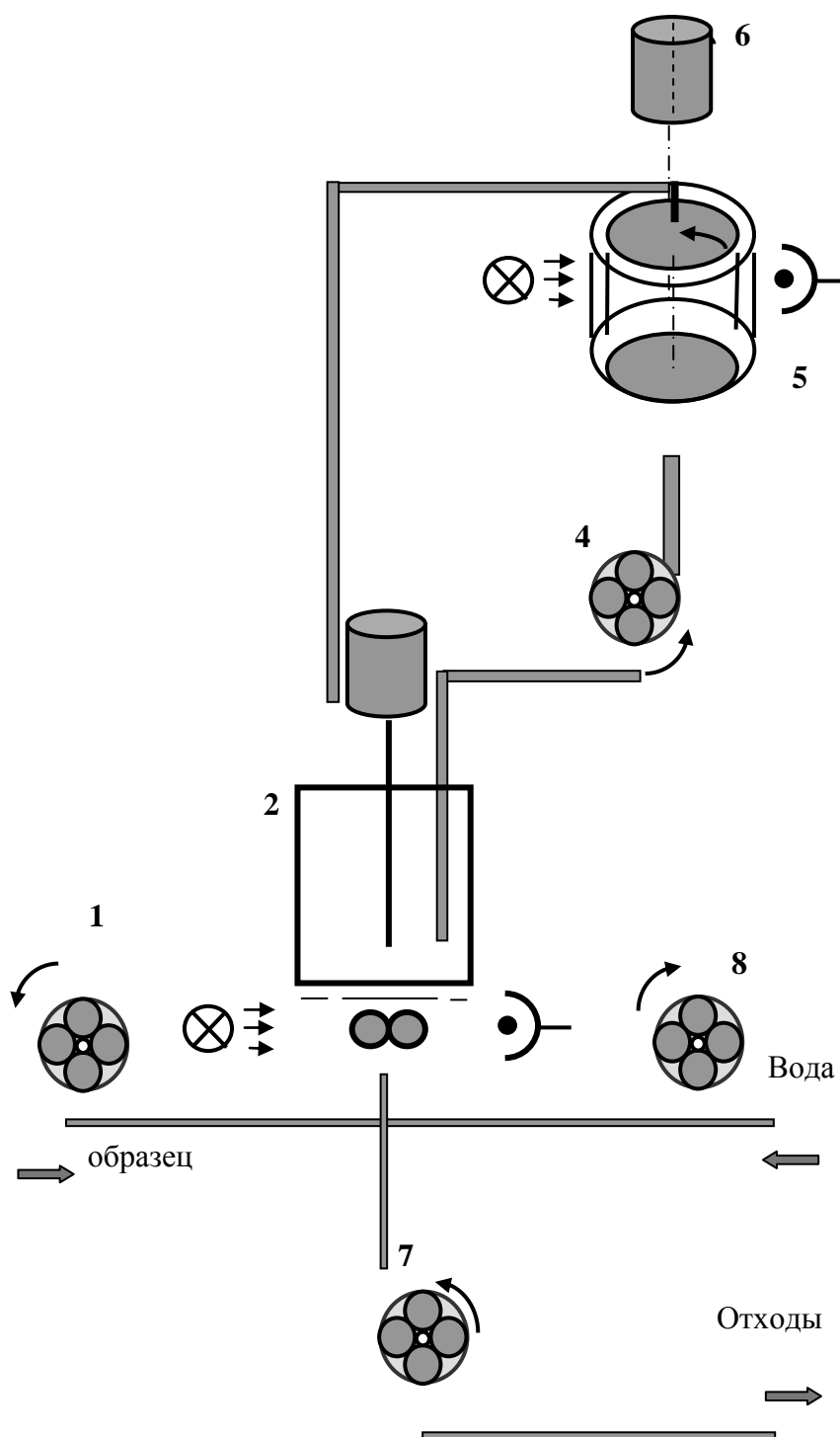


Рис.3 Конструкция прибора для измерения размера частиц ротационно-оптическим способом с использованием гидродинамической ориентацией в цилиндрическом потоке Taylor-Couette

Исследуемый образец с помощью насоса **1** подается в камеру хранения **2**, где он может разбавляться водой от насоса **8** и перемешиваться мешалкой **3**. Для контроля камера хранения имеет оптический сенсор, состоящий из излучателя и фотоприемника.

С помощью насоса 4 суспензия заполняет измерительную камеру 5. Насос 7 используется для очистки гидравлической системы после завершения цикла измерения.

Все исполнительные устройства прибора подсоединены к выходам контроллера через соответствующие драйверные схемы. Преобразование фотометрических сигналов в цифровой код производится встроенными в контроллер АЦП.

Гидродинамическая ориентация частиц обеспечивается двигателем 6, который работает в старт-стопном режиме. После разгона и перехода в стационарное состояние вращение потока, двигатель выключается и его вал принудительно затормаживается кратковременным импульсом тока в реверсном направлении. После этого частицы переходят из ориентированного в хаотическое состояние. Один из примеров релаксационной кривой от клеток *Listeria*, ветеринарной вакцины против листериоза скота показан на рисунке 4.



Рис.4 Релаксационная кривая клеток *Listeria* после их гидродинамической ориентации в потоке Taylor-Couette

Оцифровка фотометрического сигнала от измерительной системы проводилась с периодом 0.1 сек. Относительное изменение сигнала составило 90 единиц на подложке в 3400 единиц. Таким образом, относительное изменение интенсивности светового потока после ориентации клеток составило 2.6%.

Рассчитанное значение среднего размера клеток составило 2.2 мкм. Относительная погрешность измерения размера в сравнении с результатами микроскопического измерения не превышала 6%.

Новый способ измерения размеров суспендированных микро- и нано- частиц на основе ротационной гидродинамической ориентации в цилиндрическом потоке Taylor-Couette обладает простотой измерительной процедуры и обеспечивает измерение размеров частиц с высокой точностью. Отсутствие пробоподготовки и оперативность процесса измерения открывает возможность широкого использования разработанных аппаратных средств для измерения размеров частиц в следующих областях науки и техники

а) биотехнологические процессы.

Размер клеток и кинетика его изменения являются важнейшим параметром, определяющим воспроизводимость процесса и идентичность его некоторому стандарту. Размер клеток является одним из показателей классификации клеток. Его отклонение от нормы как в большую, так и в меньшую сторону имеет известные причины биохимического характера. Во многих альтернативных методах процесс пробоподготовки меняет физические свойства клеток за счёт осмоса, их адаптации к изменившейся среде, механических воздействий. Представленный метод позволяет исключить пробоподготовку и сделать процедуру измерений максимально простой. Это снижает трудоёмкость и затратность измерительной процедуры

б) контроль порогового содержания микроорганизмов в жидких средах.

Является одним из необходимых анализов в технологических производствах, связанных с наличием оборотной воды. Определение превышения концентрацией частиц определенного порога позволяет вовремя провести фильтрацию воды или ее обеззараживание. Это снижает эксплуатационные затраты оборудования и обеспечивает экономию реактивов. Любой процесс легче предотвратить на стадии его образования, чем на стадии устранения последствий.

в) производство композитных материалов и коллоидов неорганического происхождения.

Качество бетона для гидротехнических сооружений и его водонепроницаемость в значительной степени зависят от размеров добавляемого в него композиционного материала. Обычно это глиняные суспензии с частицами бентонита. Определение абсолютной величины размера частиц и их полидисперсности по размерам позволяет предсказать качество бетона. Анализ размеров частиц бентонита обеспечивает получение оценки качества суспензии. Неудовлетворительные результаты анализа позволяют провести дополнительную обработку крупных частиц. Так как измерение размеров частиц бентонита может быть выполнено в течение очень короткого времени

и в полевых условиях, метод обеспечивает постоянное поддержание качества бетона на высоком уровне.

При производстве композитных материалов и различных мастик разработанный прибор и метод обеспечивают быстрое определение гранулометрического состава компонент исходной смеси в любых условиях.

Сочетание быстроты измерения параметра, отсутствие пробоподготовки и простота технических средств являются хорошими предпосылками для широкого использования разработанного метода и технических средств его реализации.

Список литературы:

1. Патент РФ № 2443998, 27.02.2012. Бунин В. В. Способ измерения размеров анизотропных по форме суспендированных частиц.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.. Теоретическая механика, том 6 - Москва, Наука, 1986.
3. Трусделл К.. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред - Москва, Мир, 1975.
4. Хаппель Д., Бреннер Г.. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса-Москва, Мир, 1976.
5. Qi D., Quo Li-Shi. Orientational and Rotational Behaviour of Three-Dimensional Spheroidal Particles in Couette Flow // J.Fluid.Mech., 2003, 477, 201-213
6. Yeo K., Maxey M.. Dynamics of concentrated suspensions of non-colloidal particles in Couette flow // J.Fluid.Mech., 2009, 649, 205-231
7. Стоилов С., Шилов В. Н., Духин С. С., Сокеров С., Петканчин И. Электрооптика коллоидов.- Киев: Наукова думка, 1977.
8. De la Torre, G., Blumfield, V.A. Hydrodynamic properties of macromolecular complex: II Rotation. // Biopolymer V. 16, 1765-1778, 1977.
9. De la Torre G, Blumfield V.A. Hydrodynamic properties of complex, rigid biological macromolecules; theory and application. // Quarterly reviews of biophys., V. 14, N. 1, 31-139. 1981.