

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА

## КРАТКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ

Д.Беленький, Д.Балаханов, Е.Лесников, к.ф.-м.н., ФГУП "ВНИИФТРИ"  
belenky@vniiftri.ru

УДК 543.08,  
БАК 02.00.02

Приведено описание основных методов измерения дзета-потенциала, элементарных и модифицированных теоретических моделей для различных дисперсных систем. Обсуждаются области применения, а также преимущества и недостатки различных способов определения дзета-потенциала с учетом конкретных свойств исследуемых веществ. Проанализированы методики обработки экспериментальных данных для расчета электрокинетического потенциала. Предложено использование дзета-потенциала для экспресс-оценки стабильности коллоидных растворов в пищевой, фармацевтической и химической промышленности, биологии и медицине.

### УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ. ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛ

Устойчивость – одна из основных характеристик состояния дисперсных растворов. Постоянный контроль стабильности коллоидных систем необходим для выполнения широкого круга задач науки и техники. Для водных растворов, ионных жидкостей, аэрозолей определены условия их кинетической стабилизации. Разработаны химико-технологические подходы к воспроизведению длительной устойчивости коллоидов (стабилизация по кинетическому фактору) при их расчетной термодинамической неустойчивости. Среди кинетических параметров стабильности коллоидной системы дзета-потенциал – один из наиболее востребованных и исторически практически значимых. Его также используют для изучения поверхностной морфологии и адсорбции на частицах и других поверхностях в контакте с жидкостью. Прямая зависимость коагуляционной устойчивости суспензий и эмульсий от дзета-потенциала делает этот параметр незаменимым при экспериментальной экспресс-оценке характеристик стабильности дисперсных водных растворов, включая растворы наночастиц. Развитие теории Штерна – Гельмгольца о двойном электрическом слое и широкомасштабное применение электрофоретических методов в метрологической практике позволяет отнести экспериментальное определение дзета-потенциала к обоснованным, как со стороны фундаментальной электрохимической кинетики, так и практической химической технологии и биотехнологии.

Дзета-потенциал – расчетная величина, получаемая в результате количественной обработки экспериментальных данных в рамках известных теоретических моделей. Существует множество различных теорий, которые подходят при определенных условиях для разных видов реальных дисперсных систем. Теории делятся на две группы: элементарные и модифицированные. Можно выделить три типа методов определения дзета-потенциала: электрокинетические, оптические и электроакустические.

### ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА

Элементарные теории для непроводящих твердых тел являются общими для всех электрокинетических явлений [1]. В них рассматривается только один параметр двойного электрического слоя (ДЭС) – дзета-потенциал, определяемый из экспериментальных данных. Модифицированные теории содержат дополнительные параметры, например, длину Дебая, поверхностную проводимость, потенциал Штерна [2–4].

Наиболее распространена теория Смолуховского, применимая для любых электрокинетических явлений при выполнении трех условий.

Первое: размеры ДЭС должны быть малы по сравнению с характеристическим размером гетерогенной системы:

$$k \cdot a \gg 1, \quad (1)$$

где  $k$  – обратная длина Дебая,  $\text{м}^{-1}$ ;  $a$  – радиус частицы,  $\text{м}$ . Условию (1) удовлетворяют многие водные дисперсные системы. Оно не распространяется на наночастицы

в водных растворах с низкой ионной силой и на многие органические жидкости.

Второе условие – незначительный вклад поверхностной проводимости  $K^{\sigma}$ . Когда ее учет необходим, применяют уравнение Бикермана [5] и теорию Максвелла – Вагнера – О'Конски [6–8]. Величину относительной поверхностной проводимости выражают безразмерным числом Духина ( $Du$ ), которое связывает поверхностную и объемную проводимости соотношением:

$$Du = \frac{K^{\sigma}}{K_m \cdot a}, \quad (2)$$

где  $K^{\sigma}$  – поверхностная проводимость, См;

$K_m$  – проводимость дисперсионной среды, См/м;

$a$  – локальный радиус кривизны поверхности, м.

Число Духина удовлетворяет условию:

$$Du \gg 1. \quad (3)$$

Третье условие состоит в том, что граница раздела сред не проводит электрический ток между фазами.

Уравнение Смолуховского для электрофоретической подвижности  $\mu$  имеет вид [1]:

$$\mu = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \zeta}{\eta}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$\eta$  – динамическая вязкость, Па·с;

$\zeta$  – дзета-потенциал, В.

Уравнение (4) справедливо для любой модели ДЭС.

Применение модифицированных теорий представляет собой более сложную задачу, но позволяет подробнее описать электрические свойства поверхностей. Двумя наиболее важными параметрами являются длина Дебая  $k^{-1}$  и число Духина ( $Du$ ) [2, 12, 13]. Существуют две аналитические теории электрофореза [9–11], которые также можно применить на практике для расчетов: упрощенная теория Духина – Семенихина и теория О'Брайана [12].

Перекрывание ДЭС – еще один фактор, который усложняет теоретическую интерпретацию. Для неполярных суспензий перекрывание ДЭС может проявиться даже при низких объемных долях [12, 13].

Чаще всего применяют элементарные электрокинетические теории, которые в силу относительно высокой погрешности и достаточно трудоемкого измерительного процесса, подходят только для оценки дзета-потенциала, а не его точного определения.

Один из самых распространенных электрокинетических методов – электрофорез. Он особенно популярен в биологии и фармацевтике для исследования белков и нуклеиновых кислот. Макромолекулы

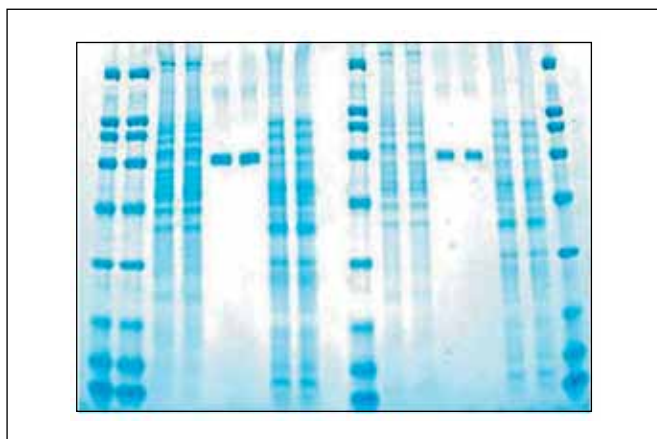
в буферном растворе обладают суммарным электрическим зарядом, величина и знак которого зависят от pH среды. Если через этот раствор, заключенный в канал из изолирующего материала, пропускать электрический ток, то вдоль канала установится определенный градиент потенциала, то есть возникнет электрическое поле. Его напряженность измеряется разностью потенциалов между концами рабочего канала (или его участка), отнесенной к его длине [14–16].

Под действием поля макромолекулы в соответствии со своим суммарным зарядом двигаются с разной скоростью в направлении катода или анода. С течением времени исходный препарат разделяется на распределенные по длине канала зоны молекул, мигрирующих с одинаковой скоростью. В современных приборах рабочий канал заполняют гелем.

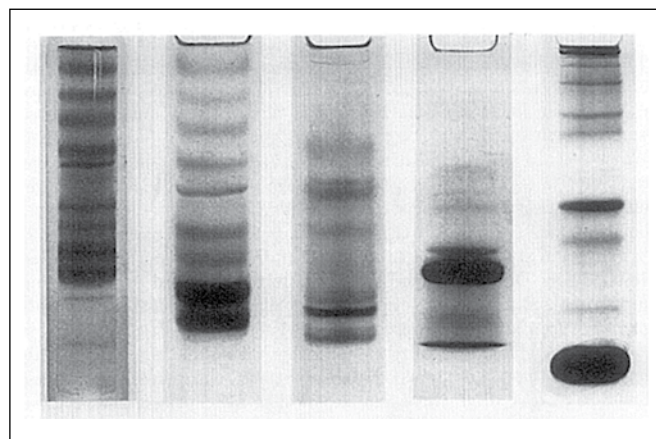
Достаточно чистая и хорошо смачиваемая (гидрофильная) пространственная сетка геля удерживает жидкость от вытекания и препятствует конвекции. Вместе с тем используемые гели содержат очень много жидкости (80–99,5%), в которой (т. е. в рабочем буфере) и мигрируют макромолекулы [18]. При этом они неизбежно сталкиваются с нитями полимера, образующего сетку геля, что увеличивает эффективное трение о среду и снижает скорость движения молекул. Если средний диаметр пространственных ячеек геля соизмерим с размерами макромолекул, которые не могут "протиснуться" через поры, то миграция прекращается. Поэтому сегодня, как правило, используют полиакриламидные гели (ПААГ) и гели агарозы. Изменяя концентрацию полимера, можно получать гели с очень широким диапазоном размеров пор, а варьируя pH буфера или добавляя в него денатурирующие агенты или детергенты – менять электрические заряды макромолекул. Благодаря такой исключительной гибкости электрофорез обладает широкими возможностями [17].

В ходе электрофореза зоны растворенных макромолекул остаются невидимыми. Для наблюдения за процессом в исходный препарат добавляют краситель, молекулы которого несут электрический заряд того же знака, что и фракционируемые макромолекулы, но не взаимодействуют с ними. Краситель передвигается в электрическом поле в виде окрашенной зоны, его подбирают таким образом, чтобы скорость миграции наиболее подвижных макромолекул была несколько ниже, чем у молекул красителя. Когда окрашенная зона доходит до конца трубки, электрофорез прекращают [15–17].

Разделившиеся зоны биополимеров во избежание их диффузии немедленно фиксируют, после чего (или



**Рис.1.** Трубки с ПААГ после окончания электрофореза.  
Горизонтальные полосы – окрашенные белковые зоны



**Рис.2.** Пластина агарозного геля после разделения  
фрагментов ДНК [17]

одновременно) проводят окрашивание путем вымачивания геля в растворе красителя, прочно связывающегося с белком или нуклеиновой кислотой. На рис.1 хорошо видны четкие, узкие полосы разделившихся компонентов исходной смеси белков. Вместо цилиндрических часто используют гели в виде тонких пластин, заподимеризованные между двумя плоскими стеклами (рис.2–4). Такие пластины имеют важное преимущество: на них можно одновременно фракционировать несколько препаратов [19, 20]. Обычно их вносят с одного края геля на равных расстояниях друг от друга. Каждый препарат разделяется в электрическом поле независимо от своих соседей, образуя свой набор зон. На рис.2 хорошо видна серия параллельных "треков", исчерченных поперечными окрашенными полосами, в которых располагаются (в данном случае) олигонуклеотиды различной длины [17].

Преимущество горизонтального расположения пластины состоит в компактности прибора, а также в отсутствии проблемы уплотнения. Оба электродных буфера находятся в резервуарах, расположенных ниже уровня горизонтального столика, на который кладут гель. Этот столик используется и для отвода тепла от пластинки геля – в его каналах циркулирует охлаждающая вода (рис.3).

Вместо окрашивания или наряду с ним часто используют методы обнаружения разделенных зон по их радиоактивности. К ним относятся приемы регистрации полос на фотопленке посредством автордиографии или флюорографии и различные способы счета радиоактивности в геле с помощью жидкостных сцинтилляционных счетчиков.

Популярность и преимущества пластин можно объяснить тем, что гель заливают в форму для полиме-

ризации жидким, поэтому его концентрация, состав буфера и содержание добавок строго одинаковы по всему сечению геля. Следовательно, плотность тока и напряженность электрического поля также равны. Условия фракционирования разных препаратов идентичны, поэтому можно достоверно сопоставлять их состав путем сравнения положения полос в параллельных треках. Если добавить значительно более выгодные условия теплоотвода от тонкой пластинки геля по сравнению с цилиндром, то широкое распространение этой системы электрофореза вполне понятно.

Метод подвижной границы в электрофорезе широко используется для разделения компонентов в сложных растворах, например в медицине для разделения и анализа белков. При длительном электрофорезе в U-образной трубке компоненты раствора, имеющие разные подвижности, пространственно разделяются. Оптическая система устроена так, что свет, падающий на поверхность сосуда по нормали, преломляется на границах раздела растворов с разными концентрациями [21–24]. Применение сложных оптических схем с разверткой позволяет получить на выходе электрофореграмму – кривую с отдельными пиками. В электрофореграмме абсцисса каждого пика индивидуальна для каждого компонента, а его площадь зависит от концентрации соединения (рис.5). С помощью электрофореграммы можно провести качественный и количественный анализ состава образца [21, 23].

Одна из разновидностей метода – бумажный электрофорез. Вещество наносят на полоску однородной бумаги, предварительно обработанной буферным раствором, концы полоски погружают в сосуды с электродами, заполненными тем же раствором буфера. Под



Рис.3. Прибор для горизонтального электрофореза



Рис.4. Прибор для вертикального электрофореза

действием электрического поля компоненты вещества перемещаются с различной скоростью и через некоторое время останавливаются на определенном уровне. Визуально распределение пятен оценивают, применяя проявитель. Состав и концентрацию веществ в растворе определяют по положению и интенсивности окраски полос [21].

### ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА

Существуют две группы оптических методов контроля движения частиц в электрическом поле. Первая – микроскопия или микроэлектрофорез – связана с обработкой изображений частиц, наблюдаемых через микроскоп. Вторая – электрофоретическое рассеяние света – состоит в определении электрофоретической подвижности по доплеровскому сдвигу частоты рассеянного излучения [25].

Принцип методов микроскопии [26] состоит в следующем. Источник излучения освещает частицы, перемещающиеся под влиянием постоянного или переменного электрического поля. Частицы рассеивают излучение, а для получения изображения используют методы светлого или темного поля либо оба метода совместно [26]. Известно несколько подходов к обработке изображений движущихся частиц, полученных с помощью микроскопии, но они применимы только к образцам с одинаковой электрофоретической подвижностью [13]. В зависимости от степени участия оператора они классифицируются на ручной, полуавтоматический и автоматический [27, 28].

Электрофоретическое рассеяние света (ELS) является косвенным методом измерения электрофоретической подвижности  $\mu$ , основанным на доплеровском сдвиге рассеянного частицами света [13]. Когерентный свет освещает частицы, диспергированные в жидкости и находящиеся в электрическом поле. Заряженные частицы двигаются к аноду или катоду в зависимости от знака заряда, при этом частота рассеянного света зависит от их скорости и изменяется в соответствии с эффектом Доплера. Таким образом, по доплеровскому сдвигу частоты и определяют электрофоретическую подвижность [29]. Иногда разница частот модулятора и доплеровского сдвига меньше 1 Гц [25], тогда разрешение спектров недостаточное,

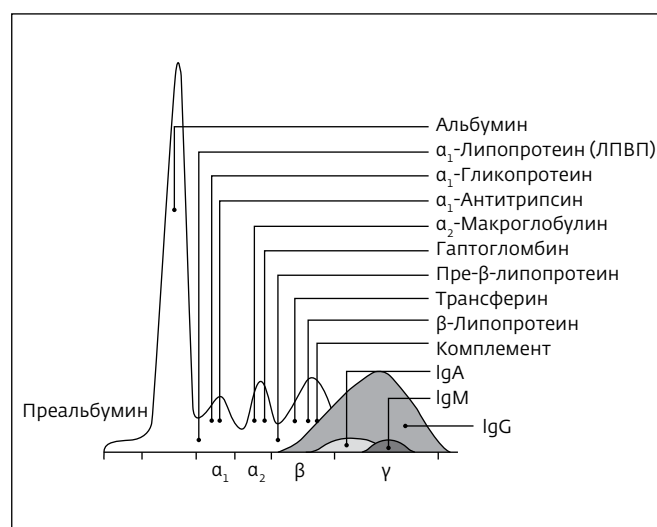


Рис.5. Электрофорезграмма белков сыворотки крови [24]

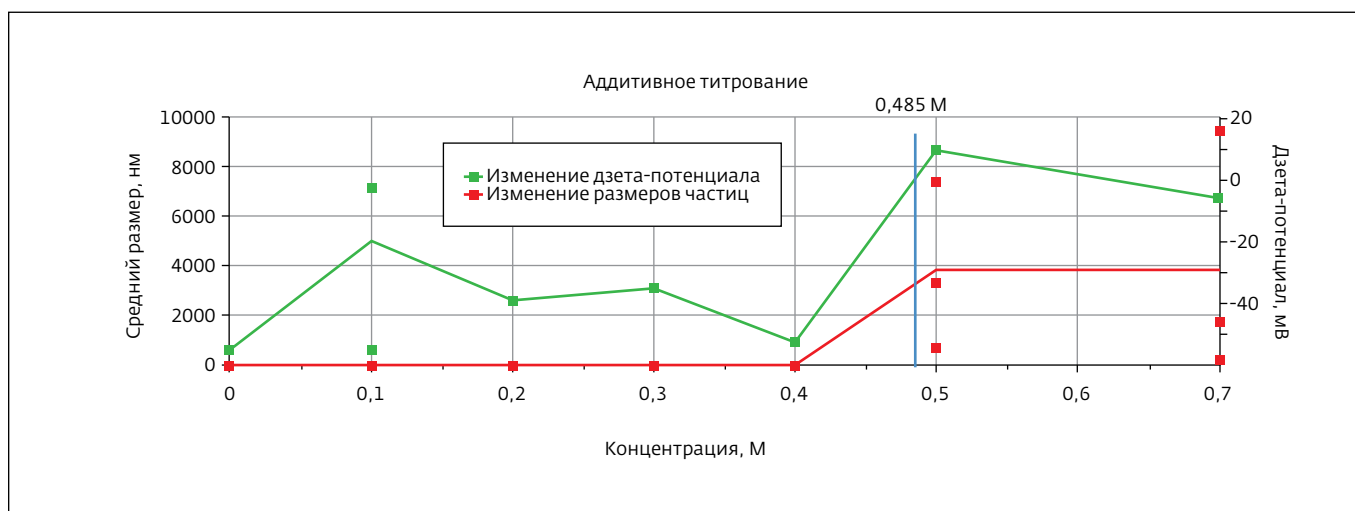


Рис. 6. Пример зависимости дзета-потенциала и среднего размера полистирольных латексных сфер от концентрации NaCl в растворе

поэтому лучше применять фазовый анализ рассеянного излучения PALS [30], который на три порядка точнее частотного.

В некоторых приборах реализована комбинация PALS и спектрального анализа с быстрой и медленной сменой напряжения для предотвращения поляризации электрода ячейки и разделения эффектов электрофореза и электроосмоса [25]. Таким способом определяют среднее значение и спектры электрофоретической подвижности [31].

Отметим, что сегодня наиболее распространены оптические методы, благодаря высокой точности и простоте измерений. Они реализованы в оборудовании таких компаний, как Malvern Instruments, Brookhaven, Beckman Coulter, Horiba, Wyatt, Photocor. Области применения приборов весьма разнообразны. Например, в химической промышленности их используют для сертификации коррозионно-стойких присадок, блескообразующих добавок, модификаторов в гальванотехнике и материаловедении. Отдельная сфера применения – контроль состояния дисперсных систем при катализе в ионных жидкостях.

Оборудование, реализующее оптические методы определения дзета-потенциала используется в фармации и фармакологии для контроля медицинских диагностических систем на предмет старения буферных растворов ферментов, антител, антигенов, нуклеиновых кислот.

В пищевой промышленности дзета-потенциал частиц взвесей, суспензий, других коллоидных систем может служить одной из ключевых характеристик старения продуктов питания и исходной

продукции сельского хозяйства. Его применение в пищевой промышленности и агропромышленном комплексе Российской Федерации обеспечит возможность государственного регулирования и контроля качества продукции недорогим интегральным способом, заменой которому может служить только дорогостоящий метод хромато-масс-спектрометрии. Особая сфера использования оценки дзета-потенциала – определение подлинности вин и минеральных вод. Она напрямую связана с вопросами пищевой безопасности. Службы санитарно-эпидемиологического надзора также могут взять на вооружение предложенные методы для своей работы.

В области биотехнологий мониторинг дзета-потенциала необходим для экспресс-контроля развития клеточных культур в биореакторах, а также для стандартизации вакцин, сывороток, ферментных препаратов, генно-инженерных векторов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОСТИ

Соотношение между доплеровским сдвигом частоты рассеянного света и электрофоретической подвижностью частиц  $\mu$  зависит от конструкции приборов. В устройствах с использованием опорного излучения электрофоретическая подвижность  $\mu$  определяется по формуле (5). Для приборов, основанных на методе кросс-корреляции излучения, подвижность  $\mu$  рассчитывают по соотношению (6) [13, 29]:

$$\mu = \frac{\Delta\omega \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n \cdot E \cdot \sin(\frac{\theta}{2}) \cdot \sin[(\frac{\theta}{2}) + \xi]}, \quad (5)$$



$$\mu = \frac{\Delta\omega \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n \cdot E \cdot \sin(\theta/2)}, \quad (6)$$

где  $\Delta\omega$  – доплеровский сдвиг частоты, рад/с;  
 $\lambda_0$  – длина излучения лазера в вакууме, м;  
 $n$  – средний показатель преломления;  
 $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  
 $\theta$  – угол между падающим и рассеянным светом, рад;  
 $\xi$  – угол между рассеянным светом и направлением электрического поля, рад;  
 $\theta'$  – угол между двумя лучами, рад.

Расширенное уравнение Генри для непроводящих сфер, описывающее зависимость между дзета-потенциалом  $\zeta$  и электрофоретической подвижностью  $\mu$ , имеет вид [13, 32]:

$$\mu = \frac{2\zeta \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}{3\eta} f(k \cdot a), \quad (7)$$

где  $\eta$  – средняя вязкость, Па·с;  
 $k$  – обратная длина Дебая, м<sup>-1</sup>;  
 $\epsilon$  – средняя диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  
 $a$  – радиус сферы, м;  
 $f(k \cdot a)$  – монотонная функция, изменяющаяся от  $f(k \cdot a)_{k \cdot a \rightarrow 0} = 1$  до  $f(k \cdot a)_{k \cdot a \rightarrow \infty} = 3/2$ .

Формула (7) получена в предположении, что:

- электрическое поле, которое действует на частицу, является суперпозицией приложенного поля и поля заряда частицы;
- искажение поля, вызванное перемещением частицы (т.е. релаксационный эффект), пренебрежимо мало;
- инерционные условия в гидродинамическом уравнении незначительны;
- поверхностный потенциал намного меньше, чем  $k_B \cdot T/e$  ( $k_B$  – постоянная Больцмана,  $e$  – элементарный заряд).

Большинство образцов – полидисперсные и имеют различные значения  $k \cdot a$ , поэтому получение для них полного распределения дзета-потенциала – сложная задача.

Если  $k \cdot a \gg 1$ , что типично для больших частиц в водных суспензиях,  $f(k \cdot a)$  принимает значение 3/2. Тогда формула (7) совпадает с уравнением Смолуховского (4).

Если  $k \cdot a \ll 1$ , что типично для мелких частиц в органических жидкостях,  $f(k \cdot a) = 1$  в формуле (7).

При определении электрофоретической подвижности и дзета-потенциала следует учитывать, что на них влияют многие факторы, например, ионная сила и pH среды, температура, наличие мицелл в суспензии. На рис.6 приведен пример зависимости

дзета-потенциала полистирольных латексных сфер при титровании солями (в данном случае – NaCl) и изоэлектрическая точка образца (0,485 М).

## ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА

В электроакустической теории используют термины, связанные с электрофоретической подвижностью  $\mu$ . Если частицы колеблются с высокой частотой, то за электрофоретическую подвижность принимают динамическую электрофоретическую подвижность  $\mu_d$ .

Взаимосвязь между динамической электрофоретической подвижностью  $\mu_d$  и экспериментальными электроакустическими данными не так проста, как для электрокинетических явлений. Электроакустическая теория О'Брайана справедлива для концентрированных и разбавленных гетерогенных сред [13, 33]. Средняя динамическая электрофоретическая подвижность согласно этой теории рассчитывается путем решения системы уравнений [34]:

$$\begin{cases} \mu_d = A_{ESA} \frac{\rho_m}{\varphi \cdot (\rho_p - \rho_m)} \frac{1}{A(\omega) \cdot F(Z)} \\ \mu_d = I_{CVI} \frac{\rho_m}{\varphi \cdot (\rho_p - \rho_m)} \frac{1}{A(\omega) \cdot F(Z)} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $A_{ESA}$  – электрокинетическая звуковая амплитуда, Па;

$I_{CVI}$  – электрический ток колеблющейся дисперсной системы, А;

$A(\omega)$  – передаточная функция средства измерения, определяемая экспериментально;

$F(Z)$  – функция акустических импедансов преобразователя и исследуемой дисперсной среды;

$\rho_m$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_p$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$  – объемная доля частиц.

Согласно теории О'Брайана полная функциональная зависимость ключевых параметров электроакустики, таких как дзета-потенциал, размер частиц и частота, вводится с помощью динамической электрофоретической подвижности. Для всех рассмотренных случаев коэффициент пропорциональности между электроакустическим сигналом и динамической электрофоретической подвижностью не зависит от размера частиц и дзета-потенциала. Эта особенность делает динамическую электрофоретическую подвижность основным параметром электроакустической теории.

Существуют два варианта динамической теории электрофоретической подвижности.

Первый – в приближении Смолуховского – при соблюдении условий, которые были сформулированы ранее: ДЭС должен быть мал по сравнению с характерным размером гетерогенной системы (см. уравнение (1)), и можно пренебречь поверхностной проводимостью (см. уравнение (2)).

В первом варианте теория О'Брайана для динамической электрофоретической подвижности применима для разбавленных систем с незначительным взаимодействием между частицами [34], причем только сферической формы, но без ограничений по размеру. Главное условие – размер частиц должен быть мал по сравнению с длиной волны звука. Эта теория более ограничена по сравнению с теорией Смолуховского для электрофореза, которая применима для любой формы частиц и концентраций [13, 33].

Второй вариант – теория О'Брайана в приближении Смолуховского для динамической электрофоретической подвижности. Эта теория почти аналогична предложенной для электрофореза, только с ограничением рассматриваемого диапазона частот. Если частота достаточно низка, динамическая электрофоретическая подвижность идентична статической. Теория применима только для электрического тока колеблющейся коллоидной системы [35, 36].

Оборудование, в котором реализованы акустические и электроакустические методы может работать только с высококонцентрированными суспензиями (суспензии белков, полипептидов), что ограничивает их применение. С другой стороны, акустические методы очень точные. Они гораздо менее чувствительны к загрязнению по сравнению с традиционными оптическими именно благодаря высокой концентрации частиц, когда примеси практически не заметны. Более того, ультразвук хорошо распространяется в очень концентрированных растворах, поэтому можно измерять дзета-потенциал без разбавления, которое неизбежно искажает результат.

## ВЫВОДЫ

На сегодняшний день в связи с развитием химической промышленности, биотехнологий, фармации и фармакологии, пищевой промышленности, а также ужесточением требований в области гидрометеорологического мониторинга и контроля загрязнения окружающей среды, возникла острая необходимость в стандартизации методов определения дзета-потенциала. В России фактическое число приборов для его измерения, построенных на разных явлениях (на основе детектирования доплеровского сдвига; прямой визуализации фронта массопереноса при элек-

трофорезе; потенциометрии), составляет около трех тысяч. Потребность рынка в таких приборах оценивается в 15–17 тыс.

Для создания метрологического комплекса, обеспечивающего передачу и воспроизведение единицы дзета-потенциала, во ВНИИФТРИ были проведены исследования теоретических моделей, методов и средств определения дзета-потенциала. Установлено, что электрокинетические и оптические методы – наиболее перспективные и гибкие в практическом применении. Для решения задачи по стандартизации дзета-потенциала оптимально сочетание фазового анализа рассеянного излучения (PALS), электрофоретического рассеяния света (ELS) и микроэлектрофореза. ВНИИФТРИ были выпущены и приняты Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации следующие Межгосударственные стандарты:

- ГОСТ 8.653.1–2016 (ISO 13099-1:2012) ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 1. Электрокинетические методы.
- ГОСТ ISO 13099-2:2016 ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 2. Оптические методы.
- ГОСТ 8.653.3-2016 (ISO 13099-3:2014) ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 3. Электроакустические и акустические методы.

В настоящий момент ведутся работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2010 [37] с целью обеспечения единства измерений в области воспроизведения и передачи единицы дзета-потенциала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Smoluchowski M.** Handbuch der Electricitat und des Magnetismus. Vol. 2 [Handbook of electricity and magnetism] // Leipzig: Barth, 1921.
2. **Lyklema J.** Fundamentals of interface and colloid science // Academic Press. 1995. Vol. 2. P. 3–208.
3. **Hunter R.J.** Foundations of colloid science // Oxford: Oxford University Press, 1989.
4. **Dukhin S.S., Derjaguin B.V.** Electrokinetic Phenomena // New York, NY: Wiley, 1974.
5. **Bikerman J.J.** Electrokinetic equations and surface conductance: A survey of the diffuse double layer theory of colloidal solutions // Trans. Faraday Soc. 1940. Vol. 36. P. 154–160.
6. **Maxwell J.C.** Electricity and magnetism. Vol. 1 // Oxford: Clarendon Press, 1892.
7. **Wagner K.W.** Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen

- [Explanation of the dielectric aftereffect processes on the basis of Maxwellian concepts] // Arch. Elektrotech. 1914. Vol. 2. P. 371.
8. **Dukhin S.S., Shilov V.N.** Dielectric phenomena and the double layer in dispersed systems and polyelectrolytes // NY: Wiley, 1974.
  9. **Dukhin S.S.** Non-equilibrium electric surface phenomena // Adv. Colloid Interface Sci. 1993. Vol. 44. P. 1–134.
  10. **Dukhin S.S., Semnikhin N.M.** Theory of Double layer polarization and its effect on the electrokinetic and electrooptical phenomena and the dielectric constant of dispersed systems // Kolloid. Zh. 1970. Vol. 32. P. 360–368.
  11. **Brien O.R.W.** The solution of electrokinetic equations for colloidal particles with its double layers // J. Colloid Interface Sci. 1983. Vol. 92. P. 204–216.
  12. ГОСТ 8.653.1–2016 (ISO 13099-1:2012) ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 1. Электрокинетические методы.
  13. **Беленький Д.И.** Методы и средства измерения дзета-потенциала // Альманах современной метрологии. 2016. № 6. С. 27–48.
  14. **Остерман Л. А.** Методы исследования белков и нуклеиновых кислот: Электрофорез и ультрацентрифугирование (практическое пособие) // М.: Наука, 1981. 288 с.
  15. **Chad M. Warren, Paul R. Krzesinski, Marion L. Greaser.** Vertical agarose gel electrophoresis and electroblotting of high-molecular-weight proteins // Electrophoresis 2003. 24. 1695–1702.
  16. **Olsson I., Britt U., Fredriksson A., Degerman M., Olsson B.** Fast horizontal electrophoresis I. Isoelectric focusing and polyacrylamide gel electrophoresis using PhastSystemT // Electrophoresis. 1988. Vol. 9. P. 16–22.
  17. **Gorg A., Obermaier C., Boguth G., Harder A., Scheibe B., Wildgruber R., Weiss W.** The current state of two-dimensional electrophoresis with immobilized pH gradients // Electrophoresis Review. 2000. Vol. 21. P. 1037–1053.
  18. **Reid M.S., Bieleckil R.L.** A Simple Apparatus for Vertical Flat-Sheet Polyacrylamide Gel Electrophoresis // Analytical biochemistry. 1968. Vol. 22. P. 374–381.
  19. **Sajantila A., Lukka M.** Improved separation of PCR amplified VNTR alleles by a vertical polyacrylamide gel electrophoresis // The International Journal of Legal Medicine. 1993. Vol. 105. P. 355–359.
  20. **Gardiner K., Laas W., Patterson D.** Fractionation of Large Mammalian DNA Restriction Fragments Using Vertical Pulsed-Field Gradient Gel Electrophoresis // Somatic Cell and Molecular Genetics. 1986. Vol. 12. № 2. P. 185–195.
  21. **Фридрихсберг Д.А.** Курс коллоидной химии // Л.: Химия, 1984. 368 с.
  22. **Фролов Ю. Г.** Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы // М.: Химия, 1988. 464 с.
  23. **Porath J.** Methodological studies of zone-electrophoresis in vertical columns I. fractionation in celluloses powder columns of substances of low molecular weight exemplified by amino acids and related compounds // Biochimica et Biophysica Acta. 1956. Vol. 22. P. 151–175.
  24. **Ткачук В. А.** Клиническая биохимия // М.: Медицина, 2004. 515 с.
  25. ГОСТ ISO 13099-2-2016 ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 2. Оптические методы.
  26. **Zsigmondy R.** Colloids and the ultramicroscope // NY: Wiley, 1914.
  27. **Gittens G.J., James A.M.** An improved microelectrophoresis apparatus and technique for studying biological cells surfaces // Anal. Biochem. 1960. Vol. 1. P. 478–485.
  28. **Goetz P.J., Penniman J.G.** A new technique for microelectrophoretic measurements // American Lab. 1976. Vol. 8. № 10. P. 21–30.
  29. **Xu R.** Particle characterization: Light scattering methods. Chapter 6. Dordrecht: Kluwer. 2000. P. 289–343.
  30. **Miller J.F.** The determination of very small electrophoretic mobilities in polar and non polar colloidal dispersions using phase analysis light scattering // J. Colloid Interface Sci. 1991. Vol. 143. P. 532–553.
  31. **Connah M.L., Kaszuba M., Morfesis A.** High resolution zeta-potential measurements: Analysis of multi-component mixtures // J. Disper. Sci. Technol. 2002. Vol. 23. P. 663–669.
  32. **Henry D.C.** The cataphoresis of suspended particles – Part I: The equation of cataphoresis // Proc. R. Soc. London Ser. A 1931. Vol. 133. P. 106–129.
  33. ГОСТ 8.653.3-2016 (ISO 13099-3:2014) ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 3. Электроакустические и акустические методы.
  34. **O'Brien R.W.** Electro-acoustic effects in a dilute suspension of spherical particles // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 190. P. 71–86.
  35. **Dukhin A.S., Shilov V.N., Ohshima H., Goetz P.J.** Electroacoustics phenomena in concentrated dispersions: New theory and CVI experiment. Langmuir 1999. Vol. 15. P. 6692–6706.
  36. **Dukhin A.S., Goetz P.J.** Ultrasound for characterizing colloids . Particle sizing, Zeta potential, Rheology // Elsevier. 2002.
  37. **Лесников Е.В., Карпов О.В., Балаханов М.В. и др.** Государственный первичный эталон единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов ГЭТ 163-2010 // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 3–6.