

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 14.05.2017 12:54:12  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e945df4a4851fd356d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий и инженерной физики

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
Локтионова  
« 15 » 05 2017 г.



## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания к выполнению лабораторных работ для  
студентов направления подготовки  
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск - 2017

УДК 544.7

Составители: А.В. Кузько, А.Е. Кузько, И.А. Шабанова

Рецензент

Директор РИЦ, д.ф.-м.н., профессор А.П. Кузьменко

**Поверхностные явления и дисперсные системы:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Кузько А.В., Кузько А.Е., Шабанова И.А. Курск, 2017. 22 с.

Излагаются методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, в которых изучаются методы получения коллоидных растворов, синтез гидрозоля и изучение его коагуляции, оптические свойства дисперсных систем, метод получения геля кремниевой кислоты, золя серебра, седиментация, методика исследования реологических свойств неньютоновских жидкостей.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и учебному плану направления подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Предназначены для студентов всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.17. Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,16. Тираж 50 экз. Заказ 3396. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ

### Теоретическое введение

Коллоиды – микрогетерогенные системы, состоящие из тонко раздробленной дисперсной фазы с размерами частиц от десятков до сотен нанометров и дисперсионной среды. Коллоиды с жидкой дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой называются золями. Основными методами получения зольей являются: конденсационные методы – укрупнение частиц в молекулярной дисперсности до коллоидной и методы диспергирования – дробления частиц. Коллоидные растворы, как и истинные, прозрачны в проходящем свете, но при боковом освещении наблюдаются рассеяние света в оптически неоднородной среде. По ходу луча в коллоидных растворах наблюдается свечение – эффект Тиндаля. Ниже представлена блок-схема «Методы получения зольей» для освоения технологии синтеза коллоидных растворов.

### Ход работы

Получим золь гидроксида железа методом конденсации. Для этого растворим в дистиллированной воде хлорид железа (III), нагреем до кипения воду. В кипящую воду по каплям добавим раствор хлорида железа. Идёт реакция полного гидролиза, образующиеся молекулы тригидроксида объединяются в агрегаты и создают ядро коллоидной частицы.

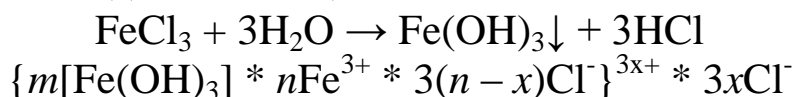


Рис. 1. Первая попытка. Слева – раствор хлорида железа (III); справа – золь тригидроксида железа.

Первая попытка получить золь гидроксида железа не удалась, поскольку хлорид железа (III), использованный в опыте, хранился в

негерметичных условиях, вследствие чего окислился до начала опыта.

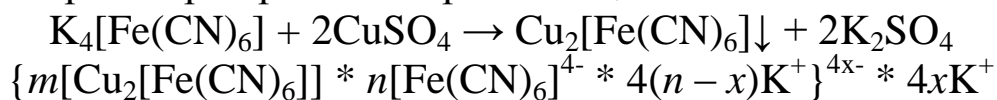


Рис. 2. Вторая попытка. Слева – раствор хлорида железа (III); по центру – золь тригидроксида железа; справа – при пропускании сфокусированного луча света через золь тригидроксида железа виден светящийся луч.

Сравним полученный раствор с истинным раствором хлорида железа. В избытке хлорида железа образовался коллоидный раствор интенсивного красно-коричневого цвета. Это золь тригидроксида железа.

Подтвердим, что полученный раствор является коллоидным, на основе его особых оптических свойств. Для наблюдения эффекта Тиндаля требуется затемнение. Пропустим сфокусированный луч света через раствор. Наблюдается светящийся луч.

Золь гексацианоферрата меди получим методом химического диспергирования – пептизации. Получим растворы гексацианоферрата калия и сульфата меди. В коническую колбу нальём раствор гексацианоферрата калия и добавим к нему раствор сульфата меди. Перемешаем содержимое колбы и оставим на 15-20 минут для завершения процесса пептизации. Получился коллоидный раствор коричнево-красного цвета.



Отметим, что если количество сульфата меди будет превышать количество гексацианоферрата калия в два раза ( $v(\text{CuSO}_4) = 2v(\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6])$ ), то коллоидный раствор не образуется. Вместо этого выпадает осадок.



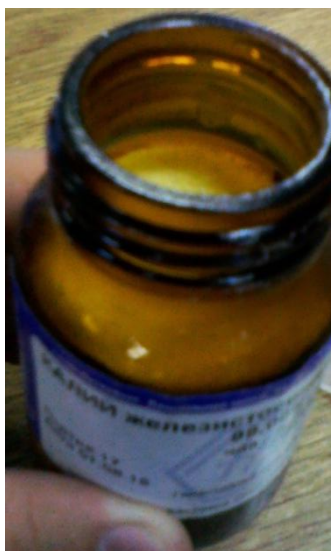


Рис. 3. Слева – сульфат меди; по центру – гексацианоферрат калия; справа – раствор красно-коричневого цвета, осадок.

## Методы получения золей

Определение: метод конденсации – метод укрупнения частиц молекулярной дисперсности до коллоидной.

Цель: получить золь гидроксида железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  методом конденсации

1. Нагреть до кипения воду, в кипящую воду по каплям добавить раствор хлорида железа

2. Идет реакция полного гидролиза  $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

3. Осадок гидроксида железа не выпадает, образующиеся молекулы гидроксида объединяются в агрегаты и создают ядро коллоидной частицы:  
$$m\text{Fe}(\text{OH})_3 + n\text{FeCl}_3 \rightarrow \rightarrow \{ [ m\text{Fe}(\text{OH})_3 ]_n \text{Fe}^{3+} \cdot x\text{Cl}^- \}^{(3n-x)*} \cdot (3n-x)\text{Cl}^-$$

Результат: образовался коллоидный раствор интенсивного красно-коричневого цвета – это золь

Определение: метод диспергирования – метод самопроизвольного дробления частиц осадка (пептизация)

Цель: получить золь гексацианоферрата меди  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  методом химического диспергирования

1. В коническую колбу налить раствор гексацианоферрата калия и добавить к нему раствор сульфата меди, перемешать содержимое колбы и оставить на 15-20 минут для завершения процесса пептизации

2. Идет реакция ионного обмена  $2\text{CuSO}_4 + \text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \leftrightarrow 2\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] \downarrow + 2\text{K}_2\text{SO}_4$

3. В избытке гексацианоферрата калия осадок  $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  не выпадает, образующиеся агрегаты стабилизируются ионами электролита  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ :  
$$m\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] + n\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \rightarrow \rightarrow \{ [ m\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] ]_n [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-*} \cdot *x\text{K}^+ \}^{(4n-x)} (4n-x)\text{K}^+$$

Результат: получился коллоидный раствор коричнево-красного цвета – это золь гексацианоферрата меди



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

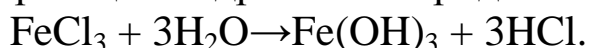
### СИНТЕЗ ГИДРОЗОЛЯ И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО КОАГУЛЯЦИИ

**Цель работы:** синтез гидрозоля гидроксида железа конденсационным методом; определение порога электролитной коагуляции золя и изучение зависимости его от заряда коагулирующего иона; определение защитного числа стабилизатора.

**Принадлежности:** ФЭК, колбы, пробирки, печь, реактивы.

#### Теоретическое введение

Гидрозоль гидроксида железа синтезируют методом конденсации путем проведения реакции гидролиза хлорида железа при 100 °С:



Реакция гидролиза  $\text{FeCl}_3$  идет интенсивно с образованием высокодисперсных нерастворимых в воде частиц  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Агрегативная устойчивость золя гидроксида железа обеспечивается, прежде всего наличием на поверхности дисперсных частиц двойных электрических слоев. Элементарная частица такого золя называется мицеллой. В основе мицеллы лежит нерастворимый в данной дисперсионной среде агрегат, состоящий из множества молекул (атомов):  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_n$ , где  $n$  – число молекул (атомов), входящих в агрегат. Поверхность агрегата может заряжаться, благодаря избирательной адсорбции ионов из дисперсионной среды или диссоциации молекул в поверхностном слое агрегата. В соответствии с правилом Пескова-Фаянса адсорбируются преимущественно ионы, входящие в состав агрегата, либо специфически взаимодействующие с ним. Ионы, сообщаемые агрегату поверхностный заряд, называются потенциалопределяющими. Заряженный агрегат составляет ядро мицеллы. При данном методе получения золя гидроксида железа ядро  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_n m\text{Fe}^{3+}$  имеет положительный поверхностный заряд за счет адсорбции ионов  $\text{Fe}^{3+}$  из среды ( $m$  – число адсорбированных ионов). Заряд ядра компенсируется эквивалентным зарядом противоположно заряженных ионов – противоионов,

расположенных в объеме среды. Противоионы, находящиеся непосредственно у поверхности ядра (на расстояниях, близких к диаметрам ионов), помимо электростатических сил испытывают силы адсорбционного притяжения поверхности. Поэтому они особо прочно связаны с ядром мицеллы и носят название противоионов адсорбционного слоя (их число  $m - x$ ). Остальные противоионы составляют диффузно построенную ионную оболочку и называются противоионами диффузного слоя (их число соответствует  $x$ ). Мицелла гидрофобного золя является электронейтральной. Толщина адсорбционного слоя  $\sigma$  мала ( $<1$  нм) и постоянна. Толщина диффузного слоя  $\lambda$  существенно больше (может быть  $>10$  нм) и сильно зависит от концентрации электролитов в системе. При высоких концентрациях электролитов или при введении многозарядных ионов (ионный фактор  $\chi$  становится большим), а толщина  $\lambda$  стремится к нулю. В этом случае противоионы адсорбционного слоя полностью компенсируют поверхностный заряд ядра. В результате достигается так называемое изоэлектрическое состояние, часто сопровождающееся потерей агрегативной устойчивости системы.

В процессе коагуляции высокодисперсного золя гидроксида железа образуются сравнительно небольшие по размерам седиментационно устойчивые агрегаты. Поэтому исследование коагуляции частиц  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  удобнее всего проводить с помощью турбидиметрического метода. Применимость этого метода основывается на сильной зависимости интенсивности светорассеяния от размеров частиц. При коагуляции частиц она повышается, соответственно увеличивается оптическая плотность золя.

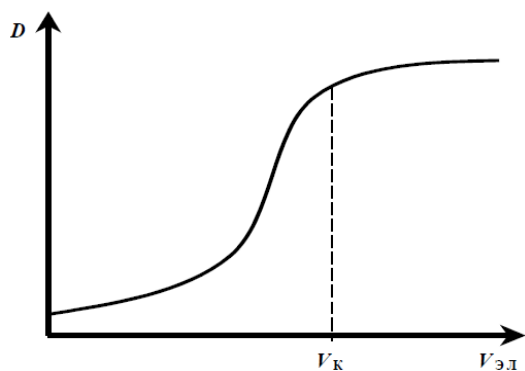


Рис. 1. Зависимость оптической плотности  $D$  золя от объема электролита – коагулятора  $V_{эл}$

Поскольку при прохождении светового потока через окрашенные золи часть света рассеивается, а часть поглощается, то при изучении коагуляции в таких системах методом турбидиметрии необходимо исключить поглощение света. Для золя  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  этого можно достичь, проводя измерения при красном светофильтре, т.е. при длине



волны падающего света  $\lambda = 620 \dots 625$  нм.

Порог быстрой коагуляции находят по пороговому объему электролита  $V_k$  (мл), при котором оптическая плотность золя достигает максимального значения, а при дальнейшем добавлении электролита не изменяется (рис. 1). Значение  $c_k$  рассчитывают по формуле

$$c_k = \frac{c_{эл} V_k}{V}, \quad (1)$$

где  $c_{эл}$  – концентрация электролита, моль/л;  $V$  – объем золя, мл.

Для предотвращения агрегации частиц и защиты гидрозолей от коагулирующего действия электролитов применяют высокомолекулярные соединения и коллоидные ПАВ, растворимые в воде, например, белки, мыла, крахмал, декстрин. Их стабилизирующее действие основано на образовании на поверхности частиц дисперсной фазы адсорбционных пленок и связано с уменьшением межфазного натяжения и со структурно-механическими свойствами поверхностных слоев.

Защитная способность полимеров или ПАВ относительно выбранного золя характеризуется защитным числом  $S$  – количеством вещества, требуемого для стабилизации единицы объема золя. Защитное число  $S$ , как и порог коагуляции  $c_k$ , определяют методом турбидиметрии. Защитное число  $S$  (г/л золя) вычисляют по уравнению

$$S = c_{см} V_{защ} / V, \quad (2)$$

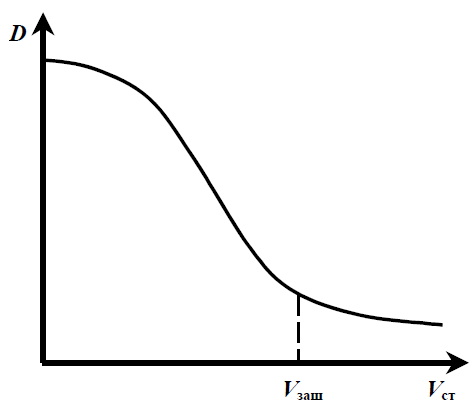


Рис. 2. Зависимость оптической плотности  $D$  золя от объема раствора стабилизатора  $V_{ст}$

где  $c_{см}$  – концентрация раствора стабилизатора, г/л;  $V_{защ}$  – объем раствора стабилизатора, необходимый для предотвращения коагуляции золя, мл.

Значение  $V_{защ}$  соответствует объему стабилизатора в золе, содержащем пороговый объем  $V_k$  электролита, при котором на кривой зависимости  $D = f(V_{см})$  появляется

нижний горизонтальный участок (рис. 2).

### Порядок выполнения работы

1. Внимательно прочитайте материалы теоретической части.



|                           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Оптическая плотность, $D$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

5. Сравните найденные значения  $c_k$  для  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CH}_3\text{COONa}$  и объясните их в соответствии с правилом Шульце-Гарди.
6. Определите защитное число полимера – желатина относительно золя  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Для этого приготовьте 10 проб, наливая в пробирки золь и растворы в следующем объеме и последовательности:
- электролит-коагулятор добавляйте через 10...15 мин после введения желатина (для адсорбции желатина на частицах золя);
  - оптическую плотность золя измеряйте через 3...5 мин после введения электролита, результаты запишите в таблицу 2.
- 7 Постройте график зависимости  $D = f(V_{\text{ст}})$ . Найдите объем раствора желатина  $V_{\text{защ}}$ , необходимый для предотвращения коагуляции золя, и по формуле (2) рассчитайте защитное число  $S$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите способы получения коллоидных систем.
2. Какие факторы обеспечивают агрегативную устойчивость зольей?
3. Каково строение мицеллы миофобного золя?
4. Что такое коагуляция? Сформулируйте правила коагуляции зольей электролитами?
5. Как рассчитать порог быстрой коагуляции? На каком методе основано его определение?
6. В чем заключается защитное действие полимеров и ПАВ? Что такое «защитное число», «золотое число»?
7. Какие вещества используются для стабилизации дисперсных систем?
8. Какими методами обеспечивают устойчивость зольей и разрушают нежелательные дисперсные системы?

## ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Щукин Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. - М.: Юрайт, 2012. – 320 с.
2. Беляев А.П. Физическая и коллоидная химия / Беляев А.П., Кучук В.И. - М.: [ГЭОТАР-Медиа](#), 2012. – 453 с.

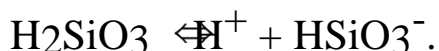
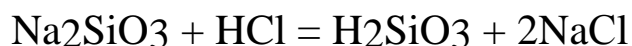
## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Ю. Г., Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – Москва, «Альянс», 2009, 520 с.
2. [Фридрихсберг Д. А.](#), Курс коллоидной химии. – Санкт – Петербург, «Лань», 2010, 345 с.
3. [Зимон А. Д., Павлов А. Н.](#), Коллоидная химия наночастиц. . – Москва, «[Научный мир](#)», 2012, 345 с.
4. Дадашев Р. Х., Термодинамика поверхностных явлений. – Москва, «Физматлит», 2007, 422 с.
5. [Зимон А. Д., Лещенко Н. Ф.](#), Коллоидная химия. – Москва, «Агар», 2003, 319 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

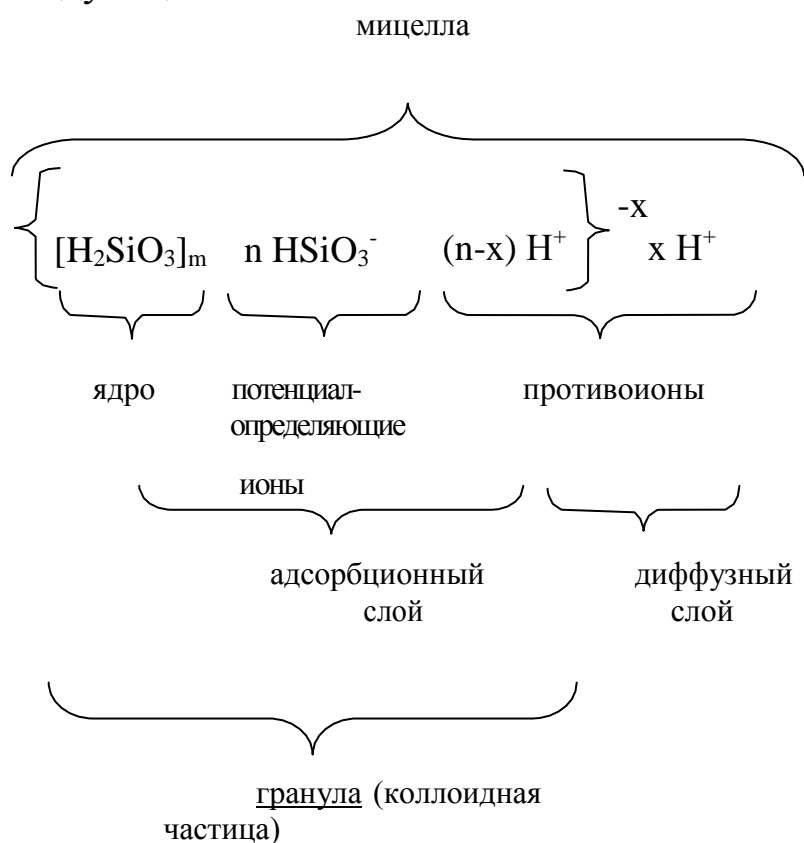
### ПОЛУЧЕНИЕ ГЕЛЯ КРЕМНИЕВОЙ КИСЛОТЫ

Достаточно часто золи получают методом химических реакций. Золь кремниевой кислоты получается в результате реакции двойного обмена:



Одним из важных свойств зелей является то, что их частицы имеют электрические заряды одного знака. Благодаря этому они не соединяются в более крупные частицы и не осаждаются.

Строение мицеллы золя кремниевой кислоты можно представить следующей схемой:



Из схемы видно, что мицелла электронейтральна, а гранула (коллоидная частица) несет электрический заряд – отрицательный.

Проведение опыта

Реактивы: раствор соляной кислоты HCl конц; раствор силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  насыщ.



В пробирку налить 1 мл концентрированной соляной кислоты HCl и прибавить 4 капли раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Содержание пробирки хорошо перемешать.

Наблюдайте образование золя кремневой кислоты. Напишите формулу мицеллы полученного золя.

### **Получение гидрогеля кремневой кислоты**

Различают лиофильные и лиофобные золи. В лиофильных золях частицы дисперсной фазы окружены сольватной оболочкой. То есть имеет место взаимодействие между дисперсной фазой и дисперсионной средой. Частицы лиофобных зелей лишены сольватной оболочки. Золь кремневой кислоты относится к лиофильным золям.

При определенных условиях коагуляция лиофильных зелей приводит к образованию студенистой массы, называемой гелем. В этом случае вся масса коллоидных частиц, связывая растворитель, переходит в полужидкое-полутвердое состояние. Гель удерживает большое количество дисперсионной среды, но вследствие ячеистой структуры проявляет свойства твердого тела.

#### **Проведение опыта**

Реактивы: 0,2 Н раствор соляной кислоты HCl; раствор силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  насыщ

В пробирку налить 5 мл раствора силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , добавить

2 мл 0,2 Н раствора HCl.

Наблюдать выделение геля кремневой кислоты. Объяснить происходящее явление.

### **Получение геля кремневой кислоты из золя**

Нагревание нарушает устойчивость зелей. Это можно объяснить следующим образом: с повышением температуры уменьшается адсорбция ионов коллоидными частицами, что ведет к уменьшению их заряда. Кроме того, разрушается сольватная оболочка у лиофильных зелей.

#### **Проведение опыта**

Реактивы: раствор соляной кислоты HCl конц.; раствор силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  насыщ.

В пробирку налить 5 капель концентрированной соляной кислоты HCl, добавить 2 капли  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Полученный золь кремневой кислоты нагреть слабым пламенем до перехода в гель.

Какое значение имеет нагревание?

Для каких коллоидов коагуляция приводит к образованию гелей?

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Все растворы, полученные в предыдущих лабораторных работах № 1-3 являются коллоидными. На основе их особых оптических свойств коллоидные растворы как истинные - прозрачны в проходящем свете, но при боковом освещении наблюдается рассеянный свет в однородной среде

По ходу луча в коллоидных растворах наблюдается свечение - эффект(конус) Тиндаля.

### Ход работы

I. Для сравнения используем дистиллированную воду и раствор хлорида железа (истинный). Кроме того, приготовим дисперсную систему с более крупными частицами это труднорастворимые фторид железа полученного смешиванием раствора хлорида железа и фторида натрия

II. Разместим растворы в порядке увеличения размера частиц:

- 1) это дистиллированная вода,
- 2) истинный раствор хлорида железа,
- 3) золь гидроксида железа,
- 4) золь гексацианоферрата меди,
- 5) гель кремниевой кислоты
- 6) дисперсная система с осадком фторида железа

III. Для наблюдения эффекта Тиндаля требуется затемнение.

Пропустим сфокусированный луч света через каждый раствор:

1 стакан раствор прозрачен, луч в нем не виден

2 стакан раствор также прозрачен, луч не виден

Вывод: в стаканах 1 и 2 находится гомогенные однофазной системы.

3 стакан наблюдается светящийся луч - эффект Тиндаля

4 стакан также наблюдается светящийся луч - эффект Тиндаля

Вывод: интенсивность свечения больше в стакане с частицами более крупного размера (золь гексацианоферрата меди имеет частицы большего размера, чем частицы гидроксида железа)

5 стакан - наблюдается опалесценция (свечение во всём объёме)

6 стакан - перемешаем его содержимое, чтобы поднять со дна более крупные частицы - также наблюдается опалесценция

Вывод: стаканах 3 и 4 микрогетерогенные системы, коллоидные растворы в стаканах 5 и 6 грубодисперсные гетерогенные системы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

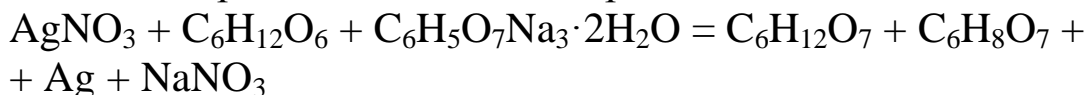
### ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

#### Цитратный метод

В цитратном методе получения наночастиц серебра и восстановителем и стабилизатором служит цитрат-ион, получаемый при растворении в воде трехзамещенной натриевой соли лимонной кислоты. при нагревании раствора и окислении цитрат-иона образуется ацетондикарбоновая и итаконовая кислоты. эти кислоты адсорбируются на поверхности частиц и контролируют их рост.

#### Ход работы

1. В 100 мл дистиллированной воды растворить 0,59 г  $\text{AgNO}_3$ . раствор довели до кипения при интенсивном перемешивании.
2. Приготовить раствор цитрата натрия: к 100 мл воды добавить 0,29 г цитрата натрия.
3. Перемешивая раствор для предотвращения его коагуляции, прилить с помощью пипетометра 10 мл раствора цитрата натрия, спустя 5 минут отобрать пробу в 5 мл.
4. Повторить процедуру с интервалом 5 минут.
5. Кипячение реакционной смеси продолжать 30 мин.



Сразу после введения восстановителя раствор приобрел желто-зеленую окраску (рис. 12).



Рисунок 12 – Полученные растворы



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: Ознакомиться с методом определения коэффициента внутреннего трения жидкости по скорости падения шарика в этой жидкости.

Приборы и принадлежности: Персональный компьютер и выход в интернет.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Вязкость (внутреннее трение) — одно из явлений переноса, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла [1].

Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей — это описывается введением силы трения. Вязкость твёрдых тел обладает рядом специфических особенностей и рассматривается обычно отдельно [1].

Различают динамическую вязкость (единица измерения в Международной системе единиц (СИ) — Па·с, в системе СГС — пуаз;  $1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ пуаз}$ ) и кинематическую вязкость (единица измерения в СИ —  $\text{м}^2/\text{с}$ , в СГС — стокс, внесистемная единица — градус Энглера). Кинематическая вязкость может быть получена как отношение динамической вязкости к плотности вещества и своим происхождением обязана классическим методам измерения вязкости, таким как измерение времени вытекания заданного объёма через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Прибор для измерения вязкости называется вискозиметром [1].

Гидродинамика вязкой жидкости была исследована Д. Г. Стоксом в 1845 г.. В своей работе «О теории внутреннего трения в движущихся жидкостях и о равновесии и движении упругих твёрдых тел» (опубликована в 1849 г.) он вывел дифференциальные уравнения, описывающие течения вязких (и, в общем случае, сжимаемых) жидкостей, ныне называемые уравнениями Навье — Стокса [2].

В 1851 году Джордж Стокс, решая уравнение Навье — Стокса, получил выражение для силы трения (также называемой силой лобового сопротивления), действующей на сферические объекты с очень маленькими числами Рейнольдса (например, очень маленькие частицы) в покоящейся вязкой жидкости:

$$F = -6\pi\eta r v \quad (1)$$

Где  $F$  — сила трения, также называемая силой Стокса,  $r$  — радиус сферического объекта,  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости,  $v$  — скорость частицы [3].

Если частицы падают в вязкой жидкости под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда эта сила трения совместно с силой Архимеда точно уравновешиваются силой гравитации. Хотя в классической формулировке закон Архимеда выполняется только в статическом случае, а не для движущихся тел, в данном случае выражение для силы Архимеда сохраняет традиционный вид. Результирующая скорость (Стокса) равна:

$$V_s = \frac{2r^2g(\rho_p - \rho_f)}{9\eta} \quad (2)$$

Где  $V_s$  — установившаяся скорость частицы (м/с) (частица движется вниз если  $\rho_p > \rho_f$  и вверх в случае  $\rho_p < \rho_f$ ),  $r$  — радиус частицы (м.),  $g$  — ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ ),  $\rho_p$  — плотность частиц ( $\text{кг/м}^3$ ),  $\rho_f$  — плотность жидкости ( $\text{кг/м}^3$ ),  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости [3].

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перейти по следующей ссылке на сайт «виртуальные лабораторные работы»: [http://www.all-fizika.com/article/index.php?id\\_article=110](http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=110)

2. Открыть виртуальную лабораторную работу «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса».

3. Запустить виртуальный прибор как показано на рисунке 1, предварительно ознакомившись с инструкцией.

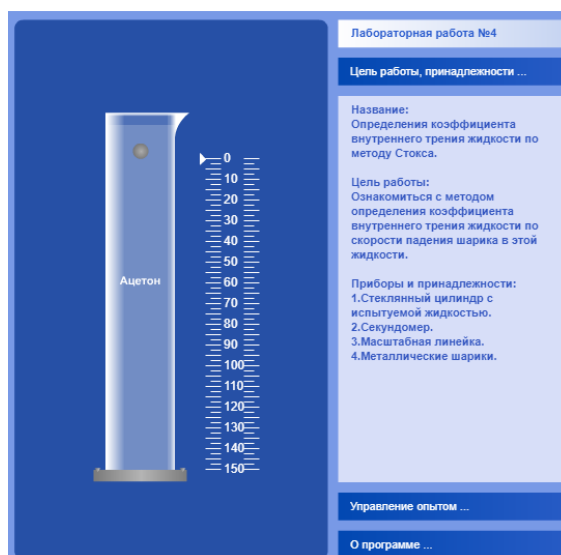


Рисунок 1

4. Провести измерения для каждой из четырех жидкостей не менее пяти раз.

5. Заполнить по результатам измерения следующую таблицу:

| № п/п | Название жидкости | Пройденное расстояние $h$ , (м.) | Измеренное время $t$ , (с.) | Среднее время $\bar{t}$ , (с.) |
|-------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|       |                   |                                  |                             |                                |

6. Вычислить для каждой жидкости погрешность случайной величины – измеренного времени падения шарика по формуле (3), приняв коэффициент Стьюдента для числа опытов  $n=5$  и доверительной вероятности  $\alpha=0.95$  равным  $l_{n,\alpha} = 2,57$ .

$\Delta t$

$$= l_{n,\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

7. Рассчитать коэффициент вязкости по формуле (4), получаемой из подстановки скорости шарика  $V = \frac{h}{t}$  в выражение (2).

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_p - \rho_f) t}{9h} \quad (4)$$

8. Сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Определение вязкости.
2. Единицы измерения вязкости.
3. Написать выражение для силы сопротивления, действующей на частицы в вязкой жидкости.
4. Какие силы действуют на частицы, если они падают в вязкой жидкости под действием собственного веса?
5. Формула Стокса
6. В чем состоит метод определения коэффициента вязкости?

Список использованных источников.

- 1) <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Вязкость> - электронный ресурс
- 2) [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Стокс,\\_Джордж\\_Габриель](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Стокс,_Джордж_Габриель) - электронный ресурс
- 3) [https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Закон\\_Стокса](https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Закон_Стокса) - электронный ресурс

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

**Цель работы:** получение реологических кривых течения коллоидного раствора с помощью ротационного вискозиметра, определение зависимостей вязкости и предела текучести от концентрации твердой фазы в суспензиях.

**Принадлежности:** вискозиметр РВ-8, растворы желатина.

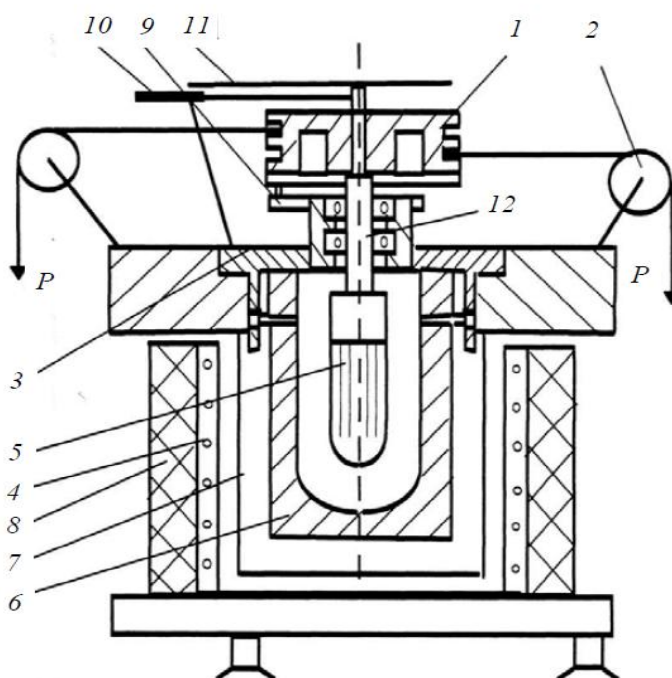
#### Теоретическое введение

Для оценки реологических характеристик дисперсных систем наибольшее распространение нашли ротационные вискозиметры, которые характеризуются широкими пределами измерения и высокой воспроизводимостью результатов. Рабочий узел таких вискозиметров чаще всего представляет собой два коаксиальных цилиндра (кроме комбинации цилиндр-цилиндр могут применяться конус-конус, полусфера-полусфера и т.д.), в зазор между которыми наливается исследуемая жидкость. Ротационные вискозиметры работают в режиме либо постоянной скорости деформации, либо постоянного напряжения сдвига. В приборах, работающих в режиме постоянной скорости деформации, один из цилиндров вискозиметра вращается с постоянной скоростью, увлекая за собой исследуемую жидкость, которая, в свою очередь, приводит во вращение второй (измерительный) цилиндр, связанный с динамометрическим устройством. При этом регистрируется изменение крутящих моментов или пропорциональных им напряжений сдвига.

В приборах с постоянным напряжением сдвига к одному из цилиндров прикладывается постоянный крутящий момент, второй цилиндр при этом неподвижен. Регистрируется скорость вращения подвижного цилиндра, пропорциональная скорости деформации исследуемой системы. Ряд конструкций ротационных вискозиметров, работающих в режиме постоянного напряжения, разработан М.П. Воларовичем. В этих вискозиметрах вращающийся внутренний цилиндр приводится в движение через



блоки падающими грузами. Скорость деформации и вязкость определяют в установившемся режиме течения, так как для коллоидных систем ламинарный поток устанавливается не



**Рис. 1. Схема установки для измерения вязкости с помощью роторного вискозиметра системы М.П. Воляровича:**

*1* – шкив; *2* – блоки; *3* – установочная гайка; *4* – спираль электронагревателя; *5* – ротор; *6* – стакан; *7* – стакан для термостатической жидкости; *8* – изоляция; *9* – стопор; *10* – шкала; *11* –

мгновенно, как в ньютоновских жидкостях, а во времени, что связано с наличием в них определенной структуры.

Схема вискозиметра представлена на рис. 1. Внутренний ротор *5* с полусферическим днищем установлен внутри неподвижного наружного цилиндра *6*. Переходная втулка соединяет внутренний ротор с валом *12*, который вращается на двух шарикоподшипниках, установленных в установочной шайбе *3*.

На верхнем конце вала закреплен шкив *1*, который стопорится специальным фиксатором *9*. При нажатии на фиксатор шкив с цилиндром освобождается и приводится во вращение под действием падающих грузов, подвешенных на тросе через блок *2*. Угол поворота цилиндра определяют по перемещению стрелки *11* на неподвижной шкале *10*. Время вращения ротора определяется по секундомеру. Наружный цилиндр закреплен в текстолитовой шайбе и застопорен в ней штифтами. Стенки сосуда *7* покрыты

теплоизоляционным материалом 8, в них закреплены электронагревательные элементы 4.

Испытуемой жидкостью заполняют зазор между коаксиальными цилиндрами. Во время испытаний измеряют крутящий момент  $M$  и угловую скорость  $\omega$  подвижного ротора. Для обеспечения гарантированного прилипания образца внутреннюю поверхность радиуса  $R_2$  и внешнюю  $R_1$  часто делают рифлеными. Обозначим через  $\tau_1$  – касательное напряжение у поверхности радиуса  $R_1$ , а  $\tau_2$  – у поверхности радиуса  $R_2$ . Касательные напряжения по модулю равны

$$\tau_1 = M/(2\pi L R_1^2) \text{ и } \tau_2 = M/(2\pi L R_2^2). \quad (1)$$

При  $a \rightarrow 0$  поле напряжений приближено к однородному. В этом случае скорость сдвига и напряжение можно вычислить по формулам

$$\gamma' = \omega_1 R_1 / a \text{ и } \tau = M / (2\pi L R_1^2). \quad (2)$$

Вязкость и предельное напряжение сдвига вычисляют по формулам

$$\eta = k_1(p - p_0)/n; \tau = k_2(p - p_0), \quad (3)$$

где  $p$  – груз, вращающий внутренний цилиндр вискозиметра, Н;  $p_1$  – минимальный груз, при котором начинается вращение цилиндра, Н;  $p_0$  – нагрузка, на преодоление трения в подшипниках;  $n$  – частота вращения ротора, об/мин;  $k_1, k_2$  – константы вискозиметра, зависящие от его геометрических размеров и степени заполнения цилиндра исследуемой жидкостью.

Константы  $k_1$  и  $k_2$  для вискозиметра РВ-8 вычисляются по формулам:

$$k_1 = \frac{21920}{683,0h + 729,9} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}; \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{21920}{16,18h + 20} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}. \quad (5)$$

где  $h$  – высота жидкости в цилиндре, м.

### Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к выполнению практической части лабораторной работы, следует внимательно прочитать материалы теоретической части, и изучить схему лабораторной установки (рис. 1).

1. Приготовьте растворы желатина заданной концентрации, общим объемом  $100 \text{ см}^3$ .

**Таблица 1. Результаты измерения реологических констант пищевых масс.**

| № опыта | $C$ , % (масс.) | $P$ , кг | $t$ , с | $n$ , об. | $\gamma'$ , $\text{с}^{-1}$ | $\eta$ , Па с | $\tau_0$ , Па |
|---------|-----------------|----------|---------|-----------|-----------------------------|---------------|---------------|
|         |                 |          |         |           |                             |               |               |

2. Внешний цилиндр вискозиметра тщательно промойте дистиллированной водой, высушите, налейте в него  $30 \text{ см}^3$  исследуемого раствора и закрепите штифтами.

3. Подвесьте на нити груз  $P$ , отпустите стопор и регистрируйте по секундомеру время  $t$ , необходимое для совершения двух поворотов лимба в установившемся режиме течения. Стационарный режим течения устанавливается после 1 – 1,5 оборотов лимба. Произведя 3-4 повторных отсчета, вычислите среднее значение числа оборотов в секунду  $n$ .

4. Последовательно подвешивайте на нити 2-3 различных груза, все увеличивающихся по весу, и для каждого из них фиксируйте время совершения двух оборотов.

5. После окончания опыта внешний цилиндр снимите и по шкале внутреннего цилиндра зафиксируйте уровень жидкости  $h$ .

6. Повторите измерение вязкости для других значений концентраций.

7. Рассчитайте по формуле (3) вязкость исследуемых растворов, занесите результаты измерения реологических констант в таблицу 1 и постройте реологические кривые течения  $\gamma' = f(p)$  и  $\eta = f(p)$  для различных концентраций.

8. Сделайте вывод о реологическом типе раствора желатина.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируют ротационные вискозиметры?
2. Объясните устройство и принцип действия ротационного вискозиметра. Перечислите достоинства и недостатки вискозиметров ротационного типа.
3. Для определения каких реологических констант используют ротационные вискозиметры?
4. По какой формуле рассчитывают эффективную вязкость?

5. Какие факторы влияют на реологические свойства материалов?
6. Как влияет концентрация дисперсной фазы на реологические свойства суспензий?
7. Что такое предел текучести и как он связан со структурой материала?

## ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Щукин Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. - М.: Юрайт, 2012. – 320 с.
2. Беляев А.П. Физическая и коллоидная химия / Беляев А.П., Кучук В.И. - М.: [ГЭОТАР-Медиа](#), 2012. – 453 с.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Ю. Г., Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. – Москва, «Альянс», 2009, 520 с.
2. [Фридрихсберг Д. А.](#), Курс коллоидной химии. – Санкт – Петербург, «Лань», 2010, 345 с.
3. [Зимон А. Д., Павлов А. Н.](#), Коллоидная химия наночастиц. . – Москва, «[Научный мир](#)», 2012, 345 с.
4. Дадашев Р. Х., Термодинамика поверхностных явлений. – Москва, «Физматлит», 2007, 422 с.
5. [Зимон А. Д.](#), Лещенко Н. Ф., Коллоидная химия. – Москва, «Агар», 2003, 319 с.