

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт прикладной математики, информатики, био- и нанотехнологий

Кафедра химических технологий

Пикалов Евгений Сергеевич

## ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» для студентов ВлГУ,  
обучающихся по направлению 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в  
химической технологии нефтехимии и биотехнологии

---

Владимир – 2015 г.

Данные методические указания включают рекомендации по подготовке к выполнению и защите лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» для студентов направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.03.02. «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», рабочей программы дисциплины «Процессы и аппараты защиты окружающей среды».

Рассмотрены и одобрены на  
заседании УМК направления  
18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»  
Протокол №9 от 01.04.2015 г.

**Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа 1. Изучение процесса отстаивания сточных вод.....	4
Лабораторная работа 2. Изучение интенсификации отстаивания сточных вод.....	8
Лабораторная работа 3. Изучение процесса фильтрации сточных вод.....	13
Лабораторная работа 4. Изучение работы циклона.....	19
Лабораторная работа 5. Изучение процесса адсорбции сточных вод.....	23
Лабораторная работа 6. Изучение процесса химической нейтрализации сточных вод....	27
Лабораторная работа 7. Изучение процесса электролиза сточных вод.....	32

## Лабораторная работа 1. Изучение процесса отстаивания сточных вод

### Цель выполнения лабораторной работы

1. Исследование динамики стесненного осаждения твердых частиц;
2. Определение времени, начальной скорости осаждения и скорости осаждения в критической точке.

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя две таблицы на основе следующей таблицы:

Время осаждения, с	Высота неосветленного слоя жидкости, см	Высота осадка, мм	Скорость осаждения, см/с		
			расчетная	экспериментальная	
				начальная	в критической точке

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отвешивается проба твердого материала и помещается в стеклянный цилиндр на 500 мл. Затем цилиндр заполняется водой на 2 – 3 см выше верхней отметки сантиметровой шкалы. В цилиндр помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из цилиндра.

После этого цилиндр ставится напротив источника света (например, освещенного окна) и из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один, который будет фиксировать

изменение границы неосветленного слоя. Содержимое цилиндра перемешивается специальной мешалкой движениями вверх – вниз до получения однородной суспензии, но не менее 3 – 4 мин.

Чтобы исключить эффект турбулентности ждут, пока граница неосветленного слоя не достигнет верхней отметки сантиметровой шкалы и включают секундомер. Если в течении 10 – 15 с визуально обнаружить границу неосветленного слоя не удастся, то суспензию вновь перемешивают. Если повторно не удастся обнаружить границу неосветленного слоя, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

Если удалось обнаружить границу неосветленного слоя, то через равные промежутки времени, заданные преподавателем, замеряют высоту неосветленного слоя и записывают время от начала эксперимента. С момента как на дне цилиндра появляется слой осадка высотой не менее 1 мм, начинают фиксировать его увеличение через эти же промежутки времени.

Когда видимая граница неосветленного слоя достигнет осадка на дне цилиндра, то записывают общее время от начала эксперимента и общую высоту осадка.

После этого сливают содержимое цилиндра в специальную емкость для слива и промывают цилиндр.

Затем отвешивают пробу другого твердого материала и повторяют исследования по изложенной выше методике. По завершении второго опыта вновь смывают содержимое цилиндра в специальную емкость и промывают цилиндр. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы для каждого опыта:

температура $t$ , °C	0	10	20	30	40	50
плотность $\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu_v \cdot 10^{-6}$ , Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho_v = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где  $t_1$  – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному;  $t_2$  – значение температуры, ближайшее большее к измеренному;  $t$  – измеренное значение температуры;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – значения плотности воды при температурах  $t_1$ ,  $t_2$ .

2. Рассчитывают критерий Архимеда для каждого опыта:

$$Ar_o = \frac{g \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}})}{\mu_{\text{в}}^2},$$

где  $d_{\text{ч}}$  – диаметр частиц пробы твердого материала, равный 0,63 мм;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц пробы твердого материала, которую берут из таблицы:

материал	глина	мел	доломит	известняк
плотность $\rho_{\text{ч}}$ , кг/м <sup>3</sup>	2200	2300	2800	1700

3. Рассчитывают объем твердых частиц для каждого опыта:

$$V_{\text{ч}} = \frac{m_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

где  $m_{\text{ч}}$  – масса пробы твердого материала, кг.

4. Рассчитывают объемную долю жидкости:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{ц}}},$$

где  $V_{\text{ц}}$  – объем заполнения цилиндра, м<sup>3</sup>.

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса для стесненного осаждения:

$$Re_o = \frac{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar_o \cdot \varepsilon^{4,75}}}$$

6. Определяют расчетное значение скорости осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \frac{Re_o \cdot \mu_{\text{с}}}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{с}}}$$

7. Строят кривую осаждения в координатах  $H = f(\tau)$ , где  $H$  – высота неосветленного слоя жидкости,  $\tau$  – время осаждения (см. рис. 1).

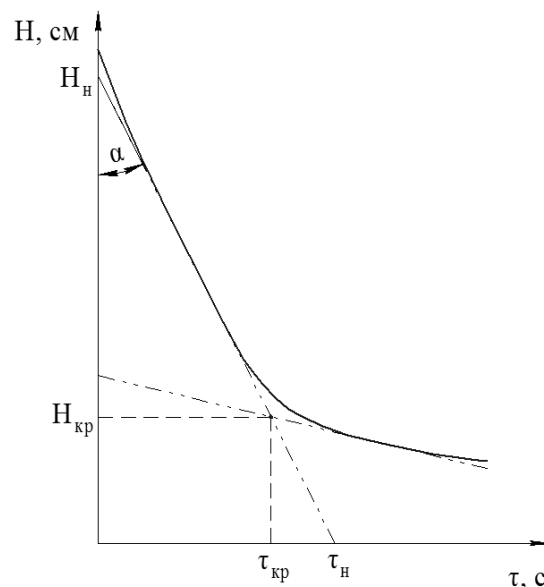


Рис. 1. Кривая осаждения

8. Определяют экспериментальные значения скорости осаждения:

- начальную скорость осаждения как тангенс угла наклона касательной проведенной к начальному участку кривой осаждения  $\alpha$  или как отношение отрезков, отсекаемых этой касательной на осях:

$$w_{\text{ос.н}} = \text{tg}\alpha = \frac{H_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}}$$

- скорость осаждения в критической точке как отношение высоты неосветленного слоя ко времени осаждения в точке, полученной при пересечении касательных к начальному и конечному участку кривой осаждения:

$$w_{\text{ос.кр}} = \frac{H_{\text{кр}}}{\tau_{\text{кр}}}$$

6. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г	Промежутки измерения, с
1	глина, доломит	10	5
2	мел, доломит	10	5
3	глина, известняк	15	2
4	мел, известняк	15	2
5	доломит, известняк	10	2
6	глина, мел	20	5

### Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие неоднородные системы можно разделять путем осаждения?
2. Какие виды осаждения, кроме гравитационного Вы знаете?
3. В каких аппаратах проводят гравитационное осаждение?
4. Для каких целей применяют осаждение?
5. В чем отличие свободного и стесненного осаждений?
6. Какие виды осадков существуют?
7. Как определяют скорость осаждения?
8. Что такое кривая осаждения? Что по ней определяют и каким образом?

### **Список литературы**

1. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);
2. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);
3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);
4. Пономарев В.Г. Процессы разделения суспензий сточных вод. Конструкции сооружений. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 228 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN978543230193.html>).

### **Лабораторная работа 2. Изучение интенсификации отстаивания сточных вод**

#### **Цель выполнения лабораторной работы**

1. Исследование влияния коагуляции на гравитационное осаждение сточных вод;
2. Исследование влияния коагуляции и флокуляции на гравитационное осаждение сточных вод.

#### **Порядок выполнения работы**

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в



лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя две таблицы на основе следующей таблицы:

Время осаждения, с	Высота неосветленного слоя жидкости, см	Высота осадка, мм	Скорость осаждения, см/с		
			расчетная	экспериментальная	
				начальная	в критической точке

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отвешивается проба твердого материала и помещается в стеклянный цилиндр на 500 мл. Затем цилиндр заполняется водой на 2 – 3 см выше верхней отметки сантиметровой шкалы. В цилиндр помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из цилиндра. После этого по заданию преподавателя готовят 10 % водный раствор коагулянта ( $Al_2(SO_4)_3$ ) в заданном количестве и добавляют его к содержимому цилиндра.

Затем цилиндр ставится напротив источника света (например, освещенного окна) и из числа студентов, выполняющих работу, выбирается один, который будет фиксировать изменение границы неосветленного слоя. Содержимое цилиндра перемешивается специальной мешалкой движениями вверх – вниз до получения однородной суспензии, но не менее 3 – 4 мин.

Чтобы исключить эффект турбулентности ждут, пока граница неосветленного слоя не достигнет верхней отметки сантиметровой шкалы и включают секундомер. Если в течении 10 – 15 с визуально обнаружить границу неосветленного слоя не удастся, то суспензию вновь перемешивают. Если повторно не удастся обнаружить границу неосветленного слоя, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

Если удалось обнаружить границу неосветленного слоя, то через равные промежутки времени, заданные преподавателем, измеряют высоту неосветленного слоя и записывают

время от начала эксперимента. С момента как на дне цилиндра появляется слой осадка высотой не менее 1 мм, начинают фиксировать его увеличение через эти же промежутки времени.

Когда видимая граница неосветленного слоя достигнет осадка на дне цилиндра, то записывают общее время от начала эксперимента и общую высоту осадка.

После этого сливают содержимое цилиндра в специальную емкость для слива и промывают цилиндр.

Затем отвешивают пробу другого твердого материала, помещают ее в цилиндр и заливают аналогичным по сравнению с первым опытом количеством воды. Потом готовят 10% водный раствор коагулянта ( $Al_2(SO_4)_3$ ) аналогично первому опыту и 0,5 % водный раствор флокулянта (полиакриламид) в заданных количествах. Растворы реагентов добавляют к содержимому цилиндра и повторяют исследования по изложенной выше методике. По завершении второго опыта вновь смывают содержимое цилиндра в специальную емкость и промывают цилиндр. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают свойства воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы для каждого опыта:

температура $t$ , °C	0	10	20	30	40	50
плотность $\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	1000	998	996	992	988
вязкость $\mu_v \cdot 10^{-6}$ , Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования. Например, плотность будет определяться по формуле:

$$\rho_v = \rho_1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где  $t_1$  – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному;  $t_2$  – значение температуры, ближайшее большее к измеренному;  $t$  – измеренное значение температуры;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – значения плотности воды при температурах  $t_1$ ,  $t_2$ .

2. Рассчитывают критерий Архимеда для каждого опыта:

$$Ar_o = \frac{g \cdot d_c^3 \cdot \rho_v \cdot (\rho_c - \rho_s)}{\mu_v^2},$$

где  $d_c$  – диаметр частиц пробы твердого материала, равный 0,63 мм;  $\rho_c$  – плотность частиц пробы твердого материала, которую берут из таблицы:

материал	глина	мел	доломит	известняк
плотность $\rho_c$ , кг/м <sup>3</sup>	2200	2300	2800	1700

3. Рассчитывают объем твердых частиц для каждого опыта:

$$V_{\text{ч}} = \frac{m_{\text{ч}}}{\rho_{\text{ч}}},$$

где  $m_{\text{ч}}$  – масса пробы твердого материала, кг.

4. Рассчитывают объемную долю жидкости:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ц}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{ц}}},$$

где  $V_{\text{ц}}$  – объем заполнения цилиндра,  $\text{м}^3$ .

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса для стесненного осаждения:

$$\text{Re}_o = \frac{\text{Ar}_o \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{\text{Ar}_o \cdot \varepsilon^{4,75}}}$$

6. Определяют расчетное значение скорости осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \frac{\text{Re}_o \cdot \mu_{\text{с}}}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{с}}}$$

7. Строят кривую осаждения в координатах  $H = f(\tau)$ , где  $H$  – высота неосветленного слоя жидкости,  $\tau$  – время осаждения (см. рис. 2).

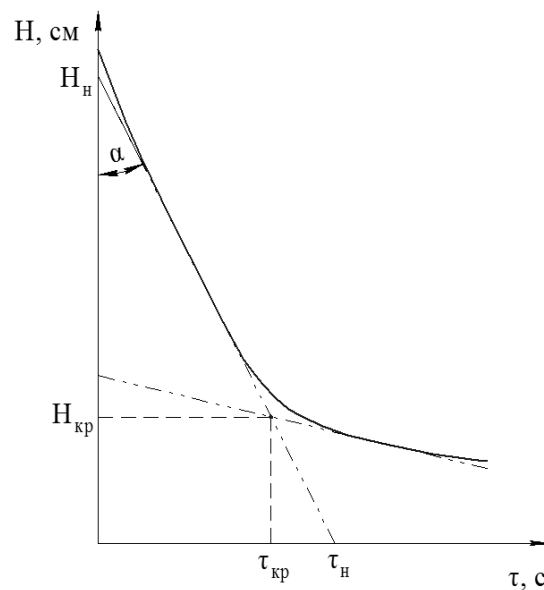


Рис. 2. Кривая осаждения

8. Определяют экспериментальные значения скорости осаждения:

- начальную скорость осаждения как тангенс угла наклона касательной проведенной к начальному участку кривой осаждения  $\alpha$  или как отношение отрезков, отсекаемых этой касательной на осях:

$$w_{\text{ос.н}} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{H_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}}$$

- скорость осаждения в критической точке как отношение высоты неосветленного слоя ко времени осаждения в точке, полученной при пересечении касательных к начальному и конечному участку кривой осаждения:

$$w_{\text{ос.кр}} = \frac{H_{\text{кр}}}{\tau_{\text{кр}}}$$

6. Делают выводы по проделанной работе, в которых сравнивают результаты 1 и 2 работ, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г	Промежутки измерения, с	Количество реагента, мл	
				коагулянт	флокулянт
1	глина, доломит	10	5	25	2,0
2	мел, доломит	10	5	20	2,0
3	глина, известняк	15	2	15	2,5
4	мел, известняк	15	2	30	2,5
5	доломит, известняк	10	2	20	2,0
6	глина, мел	20	5	25	1,5

### Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы интенсификации гравитационного осаждения?

2. В чем сущность процесса коагуляции?
3. В чем сущность процесса флокуляции?
4. Какие коагулянты и флокулянты Вы знаете?
5. Какие установки применяют для добавления коагулянтов?
6. Какие установки применяют для добавления флокулянтов?
7. Каким образом совместно применяют коагулянты и флокулянты в промышленности?
8. С какими еще процессами сочетают коагуляцию и флокуляцию?

### **Список литературы**

1. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие – Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);
2. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);
3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);
4. Пономарев В.Г. Процессы разделения суспензий сточных вод. Конструкции сооружений. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 228 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN978543230193.html>).

### **Лабораторная работа 3. Изучение процесса фильтрации сточных вод**

#### **Цель выполнения лабораторной работы**

1. Экспериментально определить константы фильтрования;
2. Определить удельное сопротивление осадка и фильтровальной перегородки.

#### **Порядок выполнения работы**

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Время от начала опыта	Объем филь- трата	Производительность фильтрующей перего- родки	$\frac{\tau}{V} \cdot 10^{-3}$	$v^2 \cdot 10^6$
$\tau, \text{с}$	$V \cdot 10^3, \text{м}^3$	$v \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{м}^2$	с/м	$\text{м}^2$

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

В соответствии с заданием отбирается проба твердого материала, помещается в смесительную емкость и заливается 550 мл воды и тщательно перемешивается. В емкость помещают термометр и оставляют на 2 – 3 мин для повышения точности измерений. Затем записывают температуру воды и извлекают термометр из емкости.

Из фильтровальной бумаги складывают воронку, которая будет выполнять роль фильтрующей перегородки. Полученную воронку помещают внутрь пластиковой или стеклянной воронки, выполняющей роль корпуса фильтра. На уровне на 1 см ниже верхнего края воронки делают отметку на фильтровальной бумаге. Полученный фильтр располагают в горле конической колбы на 50 мл.

Внутрь воронки заливают суспензию до отмеченного перед началом эксперимента уровня и включают секундомер. Уровень суспензии поддерживают постоянным во время проведения эксперимента, наливая новую порцию суспензии каждый раз, когда её уровень опускается примерно на 1/3 от первоначального. Перед добавлением суспензии в смесительной емкости нужно снова перемешивать, чтобы исключить оседание в ней твердой фазы.

Как только объем фильтрата достигает значения 50 мл, записывают время от начала эксперимента и переносят фильтровальную воронку в другую колбу. Затем полученный фильтрат сливают в ёмкость, предназначенную для сбора фильтрата.

Когда общий объем фильтрата достигает 500 мл эксперимент заканчивают. Остатки воды в воронке аккуратно сливают в ёмкость для сбора фильтрата. Затем распрямляют фильтровальную бумагу и линейкой измеряют среднюю высоту слоя образовавшегося при фильтровании осадка.

После этого выливают остатки суспензии в специальную емкость для слива, а фильтрат в канализацию, осадок и использованную фильтровальную бумагу выкидывают в урну для мусора. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывается площадь поверхности фильтрования (рис. 3):

$$F = \pi \cdot R \cdot L,$$

где  $R$  – радиус воронки, м;  $L$  – длина образующей, м.

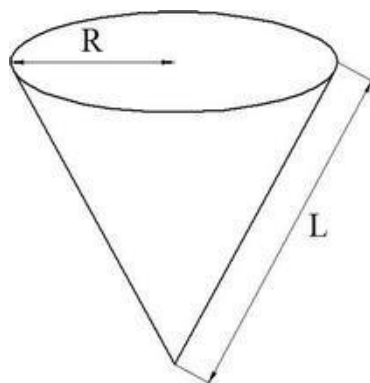


Рис. 3. К расчёту площади поверхности фильтрования

2. Рассчитывают производительность фильтрующей перегородки для каждого замера:

$$v_i = \frac{V_i}{F},$$

где  $V_i$  – объём фильтрата к  $i$ -му моменту времени,  $m^3$ .

4. Определяют суммарные значения следующих величин по столбцам таблицы результатов эксперимента:

$$\sum_1^n \tau_i ; \sum_1^n v_i ; \sum_1^n \frac{\tau_i}{v_i} ; \sum_1^n v_i^2 ,$$

где  $n$  – количество замеров.

5. Определяют производные константы фильтрования  $A$  и  $B$  из системы уравнений:

$$\begin{cases} B \cdot n + A \cdot \sum_1^n v_i = \sum_1^n \frac{\tau_i}{v_i} \\ B \cdot \sum_1^n v_i + A \cdot \sum_1^n v_i^2 = \sum_1^n \tau_i \end{cases}$$

6. Рассчитывают аналитические константы фильтрования  $C$  и  $K$  из следующих соотношений:

$$A = \frac{1}{K}; \quad B = \frac{C}{K}$$

7. По экспериментальным данным строят график зависимости производительности фильтрующей перегородки от времени фильтрования по приведённой ниже методике:

$$\frac{\tau}{v} = f(v)$$

Точка пересечения координатных осей должна располагаться посередине горизонтальной оси (оси значений производительности  $v$ ).

Между точками экспериментальных данных проводят усреднённую прямую таким образом, чтобы по обе стороны этой линии находилось одинаковое количество точек (см. рис. 4).

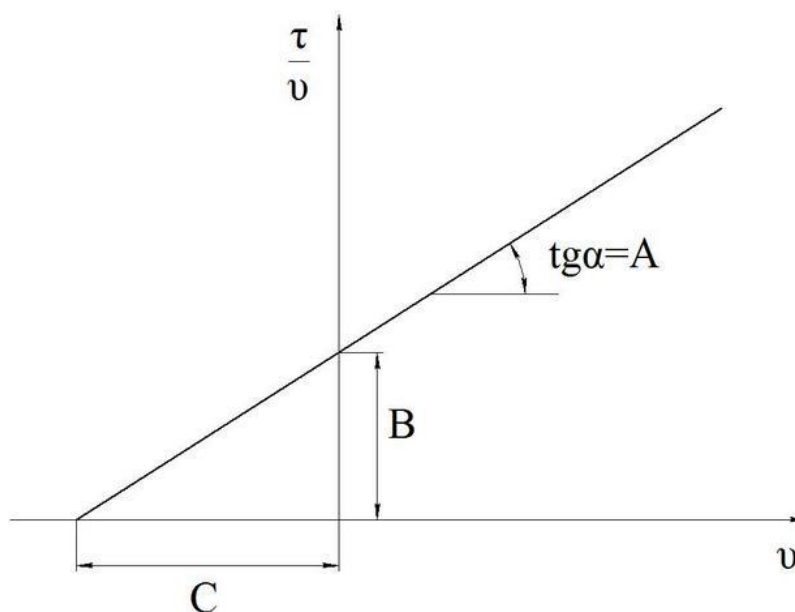


Рис. 4. Графический метод определения констант фильтрования

Усреднённую прямую проводят до пересечения с горизонтальной осью. Значение производительности фильтрующей перегородки  $v$  в точке пересечения, взятое по абсолютной величине равняется графической константе фильтрования  $C$ . Значение величины по вертикальной оси (оси значений  $\tau/v$ ) в точке пересечения с усреднённой прямой равняется производной константе  $B$ . Значение графической константы  $K$  находят по величинам  $C$  и  $B$  при помощи приведённой выше формулы.

8. Сравнивают между собой значения аналитических и графических констант фильтрования. Определяют погрешность графического метода по отношению к аналитическому:

$$\Delta C = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} \cdot 100\% ; \quad \Delta K = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max}} \cdot 100\%$$



Аналитическое определение констант с применением метода наименьших квадратов дает более точные значения констант. Поэтому в дальнейших расчетах применяют значениями К и С, найденными аналитически.

9. Рассчитывают отношение объема осадка к объему фильтрата:

$$\gamma = \frac{V_{\text{ос}}}{V_{\text{общ}}} = \frac{h_{\text{ос}} \cdot F}{V_{\text{общ}}},$$

где  $h_{\text{ос}}$  – высота слоя осадка, определённая экспериментально, м.

10. Рассчитывают вязкость воды по измеренным значениям температуры и данным таблицы:

температура t, °С	0	10	20	30	40	50
вязкость $\mu \cdot 10^{-6}$ , Па·с	1970	1310	1000	804	657	549

Для этого применяют формулу линейного интерполирования:

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{t_2 - t_1} (t - t_1),$$

где  $t_1$  – значение температуры, ближайшее меньшее к измеренному;  $t_2$  – значение температуры, ближайшее большее к измеренному;  $t$  – измеренное значение температуры;  $\mu_1, \mu_2$  – значения вязкости воды при температурах  $t_1, t_2$ .

11. Рассчитывают удельное сопротивление осадка:

$$r_{\text{ос}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{K \cdot \mu \cdot \gamma},$$

где  $\Delta p$  – разность давлений над фильтрующей перегородкой и под ней, принимаемая равной 101,3 кПа;  $\mu$  – вязкость суспензии, принимаемая равной вязкости воды, Па·с.

12. Рассчитывают сопротивление фильтровальной перегородки:

$$R_{\text{ф.п.}} = \frac{C \cdot r_{\text{ос}} \cdot \gamma}{2}$$

13. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г
1	глина	150

Вариант	Материал пробы	Масса навески, г
2	мел	120
3	известняк	100
4	доломит	120
5	глина	200
6	мел	160

### Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение и физическая сущность фильтрования?
2. Какие виды неоднородных систем можно разделить фильтрованием?
3. Что является движущей силой процесса фильтрования? Какими способами она создается?
4. Какие фильтровальные перегородки применяются в процессах фильтрования? Какие требования к ним предъявляются?
5. С помощью какого уравнения можно объяснить влияние температуры исходной суспензии на скорость процесса фильтрования?
6. Каков физический смысл удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки?
7. В какое уравнение входят константы процесса фильтрования? Что они характеризуют и какими параметрами определяются?
8. Из чего складывается сопротивление в процессе фильтрования?

### Список литературы

1. Пикалов Е.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу: учеб. пособие

– Владимир: изд-во ВлГУ, 2015. – 79 с. (наличие в библиотеке ВлГУ доступ по интернет-ссылке <http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/4205/1/01415.pdf>);

2. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);

3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);

4. Пономарев В.Г. Процессы разделения суспензий сточных вод. Конструкции сооружений. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 228 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN978543230193.html>).

#### **Лабораторная работа 4. Изучение процесса адсорбции сточных вод**

##### **Цель выполнения лабораторной работы**

1. Экспериментально определить константы адсорбции;
2. Исследовать зависимость адсорбции от концентрации растворенного вещества.

##### **Порядок выполнения работы**

Лабораторная работа выполняется группой из 2 – 3 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

$C_n$ , моль/л	$C_k$ , моль/л	x	x/m	$\lg C_k$	$\lg \frac{x}{m}$

*Примечание: пояснения к обозначениям даны в тексте*

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию. Также проверяют плотность прилегания пробок к колбам и при необходимости заменяют пробки.

Взвешивают четыре пробы по 10 г глины и каждую помещают в отдельную сухую и пронумерованную колбу. Одновременно готовят 4 водных раствора по 50 мл заданного вещества заданной концентрации  $C_n$ . Приготовленные растворы по отдельности помещают в колбы с пробами глины. Затем закрывают колбы пробками и тщательно перемешивают в течении примерно 20 мин с помощью специального встряхивателя или вручную.

После этого из фильтровальной бумаги делают четыре воронки, помещают их внутрь обычных воронок, которые размещают в горлышках следующих четырех сухих и пронумерованных колб. В эти колбы через воронки отфильтровывают содержимое первого набора колб после встряхивания.

Из каждой колбы при помощи пипетки и груши отбирают по 5 мл фильтрата и помещают их в другие сухие и пронумерованные колбы. В каждую колбу с пробой фильтрата помещают по 5 мл аммиачного буферного раствора и 2 – 3 капли индикатора (мурексид).

После этого готовят или используют готовый 0,025 М раствор трилона Б. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им колбы с фильтратом и реактивами. Трилон Б добавляют осторожно по каплям до появления сиреневого окрашивания. После каждого титрования количество трилона Б в бюретке восполняют.

Если титрование какой-л пробы не получается, то повторно отбирают 5 мл из соответствующей колбы с фильтратом, вновь добавляют буферный раствор и индикатор. После чего титруют. Если после третьего повтора результат отрицательный, то сообщают преподавателю и решают возникшие затруднения.

В случае успешного титрования всех четырех проб остатки трилона Б из бюретки сливают в отдельную колбу. Остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают конечную концентрацию ионов для каждой пробы:

$$C = \frac{C_{\text{тр.Б}} \cdot V_{\text{тр.Б}}}{V_{\text{пр}}},$$

где  $C_{\text{тр.Б}}$  - концентрация трилона Б, равная 0,025 М;  $V_{\text{тр.Б}}$  - объем трилона Б, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы раствора никеля на титрование, равный 10 мл.

2. Определяют количество адсорбированных ионов для каждой пробы:

$$x = C_n - C_k$$

3. Определяют отношение адсорбированных ионов к массе адсорбента (глины)  $m$ :

$$\frac{x}{m}$$

4. Строят изотерму адсорбции, откладывая по оси абсцисс значения  $C_k$ , а по оси ординат значение  $x/m$  (рис. 5, а).

5. Находят значения для логарифмических соотношений:

$$\lg C_k; \quad \lg \frac{x}{m}$$

6. Для нахождения постоянных адсорбции строят изотерму в логарифмических координатах (рис. 5, б)

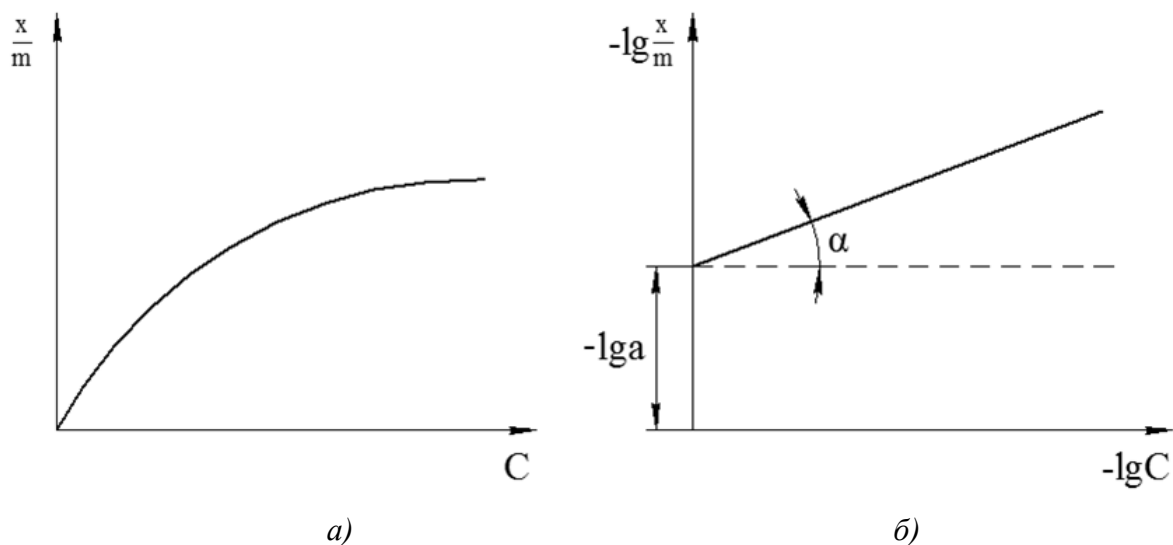


Рис. 5 Изотерма адсорбции: а) в обычных координатах; б) в логарифмических координатах

7. Находят значения постоянных адсорбции  $a$  и  $1/n$ :

$$a = 10^k; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{n}$$

8. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Адсорбируемое вещество	Концентрации адсорбируемого вещества, М	Вариант	Адсорбируемое вещество	Концентрации адсорбируемого вещества, М
1	NiS	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	4	NiS	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
2	NiCl <sub>2</sub>	0,1; 0,2; 0,3; 0,5	5	NiCl <sub>2</sub>	0,05; 0,1; 0,2; 0,5
3	NiSO <sub>4</sub>	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	6	NiSO <sub>4</sub>	0,1; 0,2; 0,3; 0,5

## Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Что называют процессом адсорбции? Для каких целей он применяется?
2. Что является движущей силой адсорбции? От чего она зависит?
3. От каких факторов зависит адсорбционная емкость?
4. Какие виды адсорбентов Вы знаете?
5. Каким образом можно провести десорбцию адсорбента?
6. Какие промышленные адсорберы Вы знаете?
7. Какими уравнениями описывается кинетика адсорбции?
8. В чем разница между адсорбцией и ионным обменом?

### Список литературы

1. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);
3. Мухутдинов А.А., Степанова С.В., Сольяшинова О.А. Физико-химические методы очистки газов (лабораторный практикум) - Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. - 140 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788212548.html>).

## Лабораторная работа 5. Изучение процесса химической нейтрализации сточных вод

### Цель выполнения лабораторной работы

1. Определить кислотность и щелочность, концентрации тяжелых металлов (меди) в пробах сточной воды;
2. Провести нейтрализацию проб сточной воды до заданных значений pH. Оценить возможность взаимной нейтрализации проб.

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

№ емкости	$C_{\text{TM}}$ , моль/л	$C_{\text{K}}$ , моль/л	$C_{\text{Щ}}$ , моль/л	Нейтрализатор		Полученное pH	$C_{\text{TM.ост}}$ , моль/л	$\eta$ , %	ПДК <sub>TM</sub>
				вещество	кол-во, мл/100 мл				

*Примечание: пояснения к обозначениям даны в тексте*

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию.

Из первой емкости с исследуемой сточной водой отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 4 – 5 капель индикатора (мурексид). После этого готовят или используют готовый 0,025 М раствор трилона Б. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды до изменения цвета. Затем добавляют по каплям аммиак (1:1) до перехода окраски в зеленоватую и продолжают титровать раствором трилона Б до достижения синеватой окраски раствора. Остатки трилона Б сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют содержание ионов металла в пробе:

$$C_{\text{тм}} = \frac{C_{\text{тр.Б}} \cdot V_{\text{тр.Б}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где  $C_{\text{тр.Б}}$  - концентрация трилона Б, равная 0,025 М;  $V_{\text{тр.Б}}$  - объем трилона Б, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

После этого из первой емкости с исследуемой сточной водой вновь отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 2 – 3 капли фенолфталеина. После этого готовят или используют готовый 0,1 Н раствор NaOH. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды до появления слабого розового окрашивания, не исчезающего 1-2 мин. Остатки NaOH сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют кислотность пробы:

$$C_{\text{к}} = \frac{C_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где  $C_{\text{NaOH}}$  - концентрация NaOH, равная 0,1 Н;  $V_{\text{NaOH}}$  - объем NaOH, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

Затем из первой емкости с исследуемой сточной водой вновь отбирают пробу 100 мл и помещают в колбу на 250 мл, добавляют 2 – 3 капли метилоранжа. После этого готовят или используют готовый 0,1 Н раствор HCl. Этот раствор заливают в бюретку и титруют им пробу сточной воды желтой окраски индикатора в розовую, устойчивую в течение 1-2 минут. Остатки HCl сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют кислотность пробы:

$$C_{\text{щ}} = \frac{C_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{HCl}} \cdot 1000}{V_{\text{пр}}},$$

где  $C_{\text{HCl}}$  - концентрация HCl, равная 0,1 Н;  $V_{\text{HCl}}$  - объем HCl, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы сточной воды, равный 100 мл.

Проводят аналогичную последовательность действий со второй пробой сточной воды.

По результатам определения рассчитывают какой объем кислотной сточной воды потребуется для нейтрализации 50 мл щелочной сточной воды из расчета, что на нейтрализацию 1 моля щелочи будет нужен 1 моль кислоты. Затем смешивают в отдельной колбе 50 мл щелочной и рассчитанное количество кислотной сточных вод. Проводят перемешивание на магнитной мешалке или вручную в течении 2 – 3 мин. После этого проводят измерение pH на pH-метре или иономере. Затем вновь перемешивают колбу в течении 2 – 3 мин и проверяют значение pH содержимого. Так продолжают пока результаты двух замеров не будут одинаковыми.



После этого определяют сколько потребуется заданного реагента на нейтрализацию 50 мл кислотной щелочной воды. Затем смешивают в отдельной колбе 50 мл щелочной и рассчитанное количество кислотной сточных вод. Проводят определение рН по аналогии со взаимной нейтрализацией стоков. Если полученное значение рН < 7, то добавляют в пробу реагент до достижения рН в пределах от 7 до 8. Если полученное значение рН больше 8, то заново отбирают пробу из емкости с кислотной сточной водой и уменьшают изначальное количество реагента до достижения рН в пределах от 7 до 8.

После достижения заданного значения рН из фильтровальной бумаги делают 2 воронки и помещают внутрь обычных воронок, которые размещают в горлышках двух конических колб на 250 мл. В эти колбы через воронки отфильтровывают содержимое нейтрализованных кислотной и щелочной сточных вод. Определяют остаточную концентрацию тяжелого металла (меди) в фильтрах по приведенной выше методике.

Определяют степень извлечения тяжелого металла:

$$\eta = \frac{C_{\text{тм.ост}} \cdot 100\%}{C_{\text{тм}}},$$

где  $C_{\text{тм.ост}}$  – остаточная концентрация тяжелого металла, моль/л.

Затем остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	№ емкостей сточной воды	Нейтрализатор	Вариант	№ емкостей сточной воды	Нейтрализатор
1	1, 2	NaOH	4	1, 2	Ca(OH) <sub>2</sub>
2	1, 3	Ca(OH) <sub>2</sub>	5	1, 3	NaOH
3	2, 3	NaOH	6	2, 3	Ca(OH) <sub>2</sub>

*Примечание: состав и концентрация веществ в исследуемых сточных водах изначально неизвестны студенту и сточные воды готовятся преподавателем и лаборантом заранее*

## Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какими способами проводят нейтрализацию кислотных сточных вод?
2. Какими способами проводят нейтрализацию щелочных сточных вод?
3. Какими способами проводят извлечение ионов тяжелых металлов из сточных вод?
4. Какие реагенты применяют для нейтрализации сточных вод?
5. На каких установках проводится реагентная нейтрализация сточных вод?
6. Какую величину обозначают рН? Чему она должна быть равна для очищенных сточных вод?
7. Какими способами можно повысить степень извлечения тяжелых металлов из сточных вод?
8. С какими методами очистки совмещают химическую нейтрализацию?

### Список литературы

1. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);
3. Пугачев Е.А. Процессы и аппараты обработки осадков сточных вод: монография. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 208 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930937923.html>).

## Лабораторная работа 6. Изучение процесса химического окисления сточных вод

### Цель выполнения лабораторной работы

1. Провести химическое окисление сточной воды хлорированием. Определить основные показатели процесса;
2. Выявить зависимость остаточного хлора от количества добавленного хлора и определить оптимальное вводимого реагента.

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студентам не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Количество добавленного хлора		Количество добавленного KI, г	Объем раствора Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> на титрование, мл	Остаточный хлор, мг/100 мл
Объем р-ра хлорной извести, мл	Содержание хлора, мг			

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Работа выполняется в следующей последовательности:

Перед началом работы проверяют, чтобы посуда была вымытой и сухой, четко пронумерованной. В ином случае заменяют посуду, обновляют нумерацию.

После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор тиосульфата натрия. Заливают раствор в

В коническую колбу отбирают 10 мл хлорной извести и разбавляют его дистиллированной водой до 100 мл с получением водного раствора (хлорной воды).

В коническую колбу наливают 10 мл водного раствора хлорной извести (хлорную воду), добавляют туда 1 г сухого KI, перемешивают до растворения и добавляют 10 мл 30 % водного раствора CH<sub>3</sub>COOH. После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор

тиосульфата натрия. Когда цвет раствора станет слабо-желтым, прибавляют 1 мл раствора крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски. Остатки тиосульфата натрия сливают в отдельную емкость.

По результатам титрования определяют поправочный коэффициент к титру растворов тиосульфата натрия и содержание хлора:

$$K = \frac{50}{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}; \quad C_{\text{Cl}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1,78 \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}},$$

где  $K$  – поправочный коэффициент для приведения концентрации раствора тиосульфата натрия точно к 0,05н;  $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  - концентрация тиосульфата натрия, равная 0,05 Н;  $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы сточной воды, равный 20 мл; 1,78 - число миллиграммов хлора, эквивалентное 1 мл 0,05н раствора тиосульфата натрия.

Определение проводят трижды и определяют среднее арифметическое значение величин  $K$  и  $C_{\text{Cl}}$ .

Затем в 8 конических колб на 250 мл отбирают по 100 мл исследуемой сточной воды и добавляют в каждую заданное количество хлорной воды. Колбы закрывают притертыми пробками, ставят в темное место и выдерживают 5 мин при температуре 16-20 °С. Параллельно с этими пробами ставят другие с такими же добавками раствора хлорной воды и выдерживают 1 ч.

По истечении заданного времени в каждую колбу добавляют сухой йодид калия в количестве, зависящем от добавленного количества хлорной воды:

хлорная вода, мл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KI, г	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Затем содержимое каждой колбы перемешивают до растворения, подкисляют 10 мл 30% раствора  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и титруют по аналогии с приведенной в начале работы методикой.

Затем остатки экспериментальных проб из всех колб сливают в специальную емкость для слива. Всю посуду тщательно промывают, наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают содержание остаточного хлора по формуле, аналогичной определению его начальной концентрации:

$$C_{\text{Cl.ост.}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1,78 \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}},$$

где  $V_{пр}$  – объем пробы сточной воды, равный 100 мл сточной воды + количество введенной хлорной воды + 10 мл раствора  $CH_3COOH$ .

2. Строят диаграммы зависимости количества остаточного хлора от количества добавленного хлора (рис. 6).

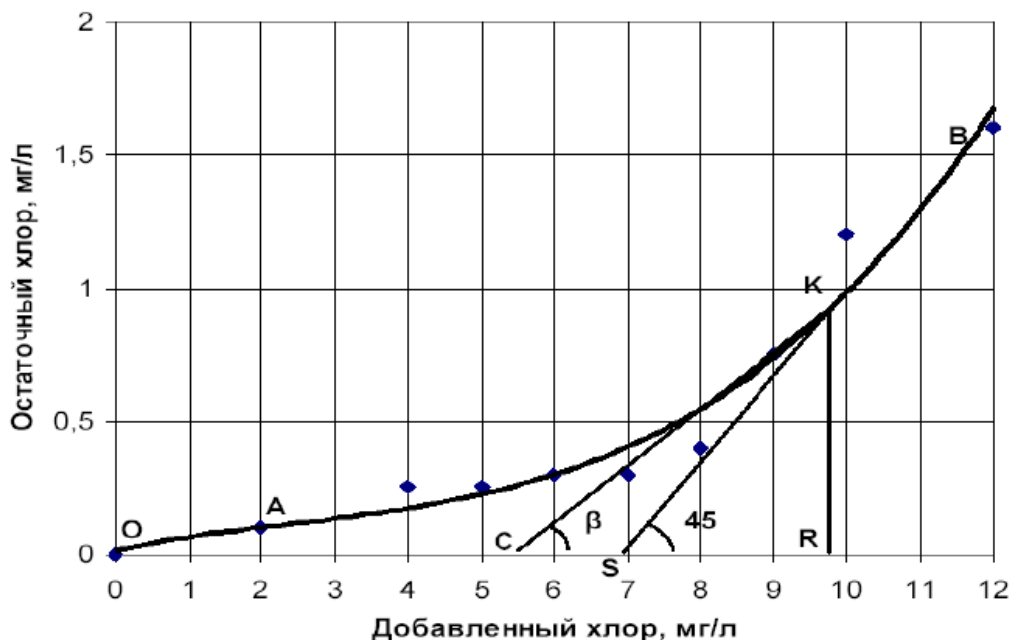


Рис. 6. Кривая определения хлороемкости

Если на диаграмме нет перехода кривой линии в прямую, то недостаточно прибавлен хлор, если отсутствует участок OA, то введено слишком большое количество хлора. Когда исследуемая вода содержит аммиак, аммонийные соли или некоторые органические амины и, когда определение остаточного хлора проводят йодометрическим методом, начальный отрезок кривой может получиться другой формы (рис. 7).



Рис. 7. Кривая йодометрического титрования активного хлора

3. После построения кривых по ним определяют:
- а) длину отрезка OA - содержание быстро реагирующих с хлором веществ;
  - б) длину отрезка АК - содержание медленно реагирующих с хлором веществ;
  - в) длину отрезка KB – характеризует отсутствие в конце опыта веществ, реагирующих с хлором;
  - г) длину отрезка ОС - количество хлора, израсходованное на окисление органических веществ и на хлорирование (действительную хлороемкость воды);
  - д) длину отрезка OS = OR-SR - количество хлора, расходуемое на окисление, замещение хлором и на каталитическое разложение;
  - е) длину отрезка OR - прибавку хлора для полноты реакции его с окисляющими и хлорируемыми веществами в воде за время проведения опыта (5 мин или 1,5 ч);
  - ж) длину отрезка CS = OS - ОС – количество хлора, прореагировавшего с водой с образованием кислорода за время проведения опыта;
  - и) площадь треугольника АКС, условно характеризующую замедленность и неполноту происходящих реакций: чем больше площадь, тем медленнее или менее полно проходят реакции в растворе;
  - к) угол  $\beta$  (наклона прямой СВ к оси абсцисс) – характеризует каталитическое разложение хлорноватистой кислоты:  $2\text{HClO} = 2\text{HCl} + \text{O}_2$ .
4. Делают выводы по проделанной работе, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	№ емкостей сточной воды	Объем хлорной воды, вводимой в пробы, мл
1	1, 2	1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10
2	1, 3	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10
3	2, 3	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10
4	1, 2	1; 2; 5; 6; 7; 8; 9; 10
5	1, 3	1; 2; 4; 5; 6; 7; 8; 10
6	2, 3	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10

*Примечание: состав и концентрация веществ в исследуемых сточных водах изначально неизвестны студенту и сточные воды готовятся преподавателем и лаборантом заранее*

## Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие окислители, применяемые для очистки сточных вод Вы знаете?
2. В чем отличие очистки питьевой воды активным хлором от очистки сточных вод?
3. На какой установке проводится окисление сточных вод «активным» хлором?
4. В каких случаях применяют химическое окисление сточных вод?
5. В каких случаях чаще применяют «активный» хлор, чем другие промышленные окислители?
6. Что называют кривой определения хлороемкости? Что по ней можно определить?
7. В чем особенности йодометрического титрования при определении хлороемкости?
8. Для чего нужен поправочный коэффициент при титровании тиосульфатом натрия? Как он определяется?

### Список литературы

1. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);
3. Пугачев Е.А. Процессы и аппараты обработки осадков сточных вод: монография. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 208 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930937923.html>).

## Лабораторная работа 7. Изучение процесса электролиза сточных вод

### Цель выполнения лабораторной работы

1. Провести электрохимическую очистку сточных вод и определить остаточное содержание тяжелого металла ( $\text{Cr}^{6+}$ );
2. Рассчитать основные показатели электрохимической очистки.

### Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется группой из 3 – 4 студентов. Перед началом работы студенты должны усвоить технику безопасности, изложенную в инструкциях, находящихся в лаборатории, и соблюдать требования этих инструкций во время нахождения в лаборатории. В ином случае студенты не разрешается находиться в лаборатории.

Работа начинается с изучения методических рекомендаций, конструкции лабораторной установки и методики проведения экспериментов на ней. Затем студенты готовят черновик для записи экспериментальных данных, который включает в себя следующую таблицу:

Время от начала опыта, с	Напряжение, В	Концентрация $\text{Cr}^{6+}$ , мг/л		$\text{Э}_п$	$\text{ВТ}_{\text{общ}}$ , %	$\text{W}$ , кВт·ч/л
		начальная	остаточная			

*Примечание: пояснения к обозначениям даны в методике обработки результатов эксперимента*

Готовность к выполнению работы оценивается по результатам беседы с преподавателем, ведущем занятия. В случае готовности к выполнению студенты получают задание от преподавателя в соответствии с вариантами, указанными в данных методических рекомендациях. В ином случае студенты не допускаются к выполнению работы.

Данная работы проводится на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 8.

Перед началом работы проверяется правильность сборки установки и целостность изоляции проводов. Также проверяют, чтобы стакан 1 был пустым чистым и вытерт насухо. При обнаружении неисправности о ней сообщается преподавателю, и она устраняется.

Если установка готова к работе, то в коническую колбу на 250 мл помещают 0,5 г KI, растворяют в 2 мл дистиллированной воды, последовательно прибавляют 5 мл серной кислоты и 10 мл 0,01 н раствора  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Разбавляют полученную смесь водой до 100 мл, закрывают колбу пробкой, перемешивают и ставят в темное место на 5 мин. После этого готовят или используют готовый 0,05 Н раствор тиосульфата натрия. Когда цвет раствора станет слабо-



желтым, прибавляют 1 мл раствора крахмала и продолжают титрование до исчезновения синей окраски.

Определяют поправочный коэффициент для 0,01 н. (0,001 н.) раствора тиосульфата натрия:

$$K = \frac{10}{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}},$$

где  $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл.

Определение проводят трижды и определяют среднее арифметическое значение величины поправочного коэффициента.

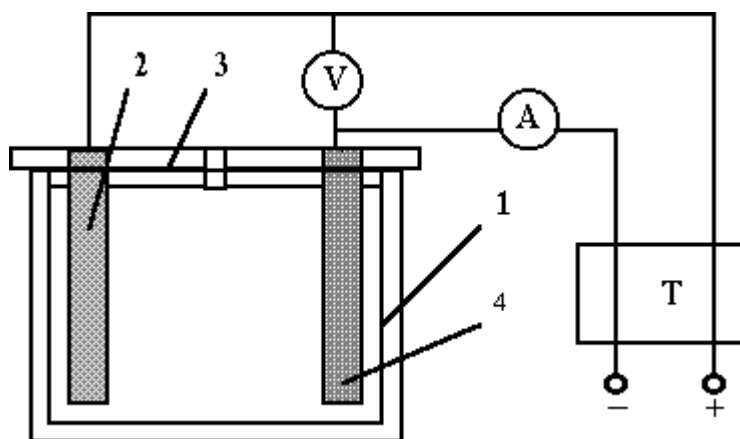


Рис. 8. Схема установки по выполнению лабораторной работы «Изучение процесса электролиза сточных вод»: 1 – стакан емкостью 250 мл; 2 – катод из стали X18H9T; 3 – крышка с отверстием; 4 – анод из свинца; А – амперметр; V – вольтметр; Т - трансформатор

После этого готовят 200 мл водного раствора  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  с концентрацией, заданной преподавателем. Затем из полученного раствора при помощи пипетки и груши отбирают пробу 10 мл и помещают ее в коническую колбу на 250 мл. В эту колбу также помещают 0,5 г KI и перемешивают до растворения, затем добавляют 5 мл серной кислоты. Разбавляют полученную смесь водой до 100 мл, закрывают колбу и ставят в темное место на 5 мин. После этого титруют содержимое колбы 0,05 Н раствор тиосульфата натрия по аналогии с методикой определения поправочного коэффициента.

Рассчитывают содержание  $\text{Cr}^{6+}$ :

$$C_{\text{Cr}^{6+}} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1000}{V_{\text{пр.}}}$$

где  $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  - концентрация тиосульфата натрия, равная 0,05 Н;  $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  - объем тиосульфата натрия, пошедший на титрование, мл;  $V_{\text{пр}}$  - объем пробы сточной воды, равный 115 мл.

Затем в крышку 3 стакана 1, выполняющего роль электролизера, вставляют воронку и заливают приготовленный раствор. После этого подключают установку к сети и выставляют при помощи трансформатора заданную силу тока. Сила тока должна поддерживаться постоянной в течении всего времени электролиза, которое задается преподавателем. При этом через каждые 15 мин измеряют напряжение, показываемое вольтметром.

После окончания электролиза выставляют силу тока на ноль и отключают установку от сети. Из стакана 1 через отверстие в крышке 3 отбирают пробу в количестве 10 мл и определяют в ней содержание ионов  $\text{Cr}^{6+}$  по методике, аналогичной определению начального содержания:

$$C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})} = \frac{C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \cdot K \cdot 1000}{V_{\text{пр}}}$$

После титрования сливают пробу и сточную воду из стакана 1 в специальную емкость для слива, промывают стакан 1 серной кислотой и дистиллированной водой в соотношении 1:4, затем промывают дистиллированной водой и насухо вытирают. Сливают остатки тиосульфата натрия из бюретки в отдельную емкость, промывают бюретку, колбы и воронку. Наводят порядок на рабочем месте и сдают его преподавателю.

Затем приступают к обработке результатов эксперимента по следующей методике:

1. Рассчитывают эффект превращения  $\text{Cr}^{6+}$  в  $\text{Cr}^{3+}$ :

$$\Theta_{\text{п}} = 1 - \frac{C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})}}{C_{\text{Cr}^{6+}}}$$

2. Рассчитывают общий выход по току при электролизе для восстановления  $\text{Cr}^{6+}$ :

$$\text{ВГ}_{\text{общ}} = \frac{(C_{\text{Cr}^{6+}} - C_{\text{Cr}^{6+}(\text{ост})}) \cdot V_{\text{в}}}{q_{\text{Cr}} \cdot I \cdot \tau} \cdot 100\%$$

где  $q_{\text{Cr}}$  – электрохимический эквивалент восстановления  $\text{Cr}^{6+}$  до  $\text{Cr}^{3+}$ , равный  $0,18 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл;  $I$  – сила тока при электролизе, А;  $\tau$  – общее время электролиза, ч;  $V_{\text{в}}$  – объем сточной воды, равный 0,2 л.

3. Рассчитывают среднее напряжение при электролизе:

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n U}{n}$$

где  $U$  – величины замеренных напряжений при электролизе, В;  $n$  - число замеров при электролизе.

4. Рассчитывают удельный расход электроэнергии на обезвреживание 1 л хромсодержащих стоков:

$$W = \frac{U_{\text{ср}} \cdot I \cdot \tau}{V_{\text{в}} \cdot \Theta_{\text{п}}}$$

5. Делают выводы по проделанной работе, в которых сравнивают результаты 1 и 2 работ, оформляют отчет и готовятся к защите на следующем занятии.

### Варианты индивидуальных или групповых заданий

Для выполнения данной работы преподаватель может задать следующие варианты исходных значений:

Вариант	Концентрация раствора $K_2Cr_2O_7$ , %	Сила тока при электролизе, А	Время электролиза, мин
1	5	6	30
2	8	5	40
3	10	4	30
4	12	3	40
5	3	8	30
6	6	6	40

### Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет должен включать в себя следующие элементы:

1. Титульный лист;
2. Цель работы;
3. Краткая теория;
4. Описание лабораторной установки с рисунком;
5. Описание методики проведения эксперимента;
6. Экспериментальные данные и их обработка;
7. Выводы по проделанной работе.

### Контрольные вопросы

1. В каких случаях проводят очистку сточных вод электролизом?
2. Какие факторы влияют на очистку сточных вод электролизом?
3. На каких установках проводят электролиз сточных вод?
4. Какие величины характеризуют процесс электролиза сточных вод?

5. Какие еще способы электрохимической очистки сточных вод Вы знаете?
6. Какие методы очистки применяют для обезвреживания хромсодержащих сточных вод?
7. Какие процессы происходят при электролизе хромсодержащих сточных вод?
8. Какими методами определяют содержание ионов хрома в сточных водах?

### **Список литературы**

1. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие - М.: Абрис, 2012. - 397 с. (доступ по интернет-ссылке: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200308.html>);

2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов: электронный ресурс - М.: Абрис, 2012 (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200322.html>);

3. Пугачев Е.А. Процессы и аппараты обработки осадков сточных вод: монография. - М.: Издательство АСВ, 2015. - 208 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930937923.html>).