

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТЛОЖЕНИЙ С ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Физико-химические процессы и теплообмен в элементах
энергетического оборудования», для студентов I–II курсов, обучающихся по
направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Составители Н.В. Визгавлюст, Г.А. Черкашина, К.В. Буваков

УДК 543.2:621.1
ББК 31.36я7

Химический анализ отложений с внутренних поверхностей нагрева энергетического оборудования : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физико-химические процессы и теплообмен в элементах энергетического оборудования», для студентов I–II курсов, обучающихся по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» / сост. : Н.В. Визгавлюст, Г.А. Черкашина, К.В. Буваков. – Томск : Томский политехнический университет, 2025. – 33 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к использованию в учебном процессе
«30» января 2025 года, протокол № 1.

И.о. руководителя НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ,
к.т.н., доцент



Т.С. Тайлашева

Оглавление

Введение	4
1 Цель и основные задачи лабораторной работы	7
2 Требования техники безопасности.....	7
3 Экспериментальная часть	9
3.1 Общие требования к проведению анализов.....	9
3.2 Отбор проб.....	11
3.3 Подготовка пробы.....	12
3.4 Определение потери или увеличения массы при прокаливании....	13
3.5 Анализ водорастворимой части пробы отложений.....	14
3.5.1 Определение щелочности	15
3.5.2 Определение жесткости (суммарной массовой доли кальция и магния)	16
3.5.3 Последовательное определение массовой доли кальция и магния	17
3.6 Анализ нерастворимой части пробы отложений.....	19
3.6.1 Выделение оксида кремния	21
3.6.2 Определение массовой доли железа	22
3.6.3 Определение триоксида серы.....	24
3.6.4 Определение суммы полуторных окислов (суммы оксидов железа, алюминия и титана (R_2O_3)).....	26
3.6.5 Определение оксидов кальция и магния.....	28
3.7 Обработка экспериментальных данных	29
4 Содержание отчета о работе	29
5 Контрольные вопросы	30
Список литературы	31

Введение

Вода и водяной пар являются рабочими средами для ТЭС и большинства АЭС в виду удобных и технически наиболее освоенных теплоносителей основных и вспомогательных контуров электростанции. Чистота воды и водяного пара в тепловых схемах ТЭС и АЭС, объединяемая общим понятием «водного режима» оказывает огромное влияние на экономичность и надежность работы как отдельных аппаратов и элементов, так и ТЭС, и АЭС в целом [1, 2].

Главной задачей каждой ТЭС и АЭС является обеспечение работы теплосилового оборудования (основного и вспомогательного) без повреждений и снижения экономичности при любых эксплуатационных режимах, которые могут быть вызваны следующими причинами:

- образованием отложений на внутренних поверхностях нагрева котлов, в проточной части турбин, на поверхностях трубок конденсаторов и т. д.;
- образованием и накоплением шлама в котловой воде, тракте питательной воды, в тепловых сетях;
- коррозией внутренних поверхностей теплоэнергетического оборудования.

Внедрению конкретного водно-химического режима (ВХР), т. е. комплексу технических мероприятий, на ТЭС и АЭС предшествует проведение экспериментальных и наладочных работ, цель которых определить оптимальные условия для его осуществления [2].

При выборе водно-химического режима для определенной электростанции принимают во внимание:

- тип основного оборудования (реактора, котла, турбины);
- параметры рабочей среды;
- паропроизводительность;
- вид топлива;
- теплонапряжение парогенерирующей поверхности нагрева;
- наличие или отсутствие промежуточного перегрева пара;
- требования к качеству перегретого пара и т. д.

Правильно выбранный и грамотно реализованный ВХР позволяет строго соблюдать установленные нормы качества теплоносителя, что в свою очередь гарантирует обеспечение безаварийной работы теплоэнергетического оборудования (по крайней мере в период между капитальными ремонтами).

Надежность работы любого элемента теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС определяется прежде всего:

- конструкцией оборудования;
- используемыми конструкционными материалами;
- выбранным водно-химическим режимом, обеспечивающим требуемые нормы качества теплоносителя.

Из опыта эксплуатации ТЭС и АЭС известно, что солевые отложения в больших или меньших количествах образуются на поверхностях нагрева парогенераторов, в пароперегревателях, в лопаточном аппарате турбин, на трубках конденсаторов. Трудноудаляемые отложения кремнекислоты встречаются, главным образом, в проточной части турбин [1–3].

Образование таких отложений оказывает крайне отрицательное влияние на работу как основного, так и вспомогательного оборудования потому, что отложения имеют коэффициенты теплопроводности в 20–30 раз ниже, чем металл. В ряде случаев загрязнение отдельных теплопередающих поверхностей отложениями, кроме снижения коэффициента теплопроводности, приводит к увеличению шероховатости стенок, уменьшению проходных сечений (т. е. увеличению потерь на трение). Все это при относительно невысоких температурах рабочей среды, например, в регенеративных и сетевых подогревателях, экономайзерах, конденсаторах турбин и т. д. сказывается лишь на экономических показателях работы оборудования (при толщине отложений $\delta=0,1-0,2$ мм – пережог топлива составляет порядка 1,5–2,5 %) [3].

Примеси, содержащиеся в питательной воде, могут выделяться в твердую фазу на внутренних поверхностях котлов, испарителей, конденсаторов турбин в виде накипи (отложения непосредственно на поверхности нагрева) или шлама (грубодисперсные частицы, находящиеся в объ-

еме воды). Однако четкой границы между накипью и шламом не существует, т. к. с течением времени вещества, образующие накипи, могут переходить в шлам, а шлам при определенных условиях может прикипать к поверхности.

Состав, структура и физические свойства отложений в котлах зависят в основном от химического состава питательной и котловой воды, а также от температурного режима работы оборудования. Химический состав примесей теплоносителя напрямую определяется уровнем химводоподготовки и применяемыми методами коррекции питательной и котловой воды, т. е. водно-химическим режимом.

Источником формирования отложений в теплообменном оборудовании являются:

- растворенные в воде соли;
- коллоидные (органические) вещества с размером частиц от 1 до 15 мкм;
- продукты коррозии конструкционных материалов теплообменного оборудования.

Все виды отложений вызывают ухудшение теплоотдачи и, как следствие, увеличение расхода топлива и повышение температуры металла труб.

Отложения, образующиеся на поверхностях нагрева теплоэнергетического оборудования весьма разнообразны по химическому составу, структуре, плотности, прочности связи с металлом, коэффициенту теплопроводности [1–3].

Интенсивность образования и химический состав накипи на теплопередающих поверхностях зависят от химического состава и теплофизических свойств параметров теплоносителя, от режимов эксплуатации котлов, теплообменников, систем теплоснабжения.

По химическому составу их можно подразделить на три основные группы:

- щелочноземельные;
- железистоокисные;
- медноокисные.

1 Цель и основные задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является проведение химического анализа отложений с внутренних поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования.

Задачи лабораторной работы:

- 1) определить показатели водорастворимой части пробы отложений (щелочность, суммы кальция и магния, кальция, железа);
- 2) определить показатели в нерастворимой части пробы отложений (оксид кремния, полуторные окислы ($\sum \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MeO}_2$), оксид железа, оксид кальция, оксид магния);
- 3) сделать вывод о причинах образования отложений на внутренних поверхностях нагрева теплоэнергетического оборудования.

2 Требования техники безопасности

- Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с инструкцией по технике безопасности и расписаться в журнале.
- В химической лаборатории можно работать только в специальном халате. Халат должен быть застёгнут на все пуговицы. Длинные волосы необходимо подбирать (убрать в пучок или иным способом). При проведении опытов с особо опасными веществами следует использовать респиратор, защитные очки, перчатки.
- Перед выполнением работы необходимо познакомиться с её описанием и продумать все действия, которые необходимо будет выполнить. Если при выполнении работы используются приборы и установки, то следует изучить их устройство и правила работы с ними.
- Работы с токсичными веществами необходимо проводить только в вытяжном шкафу с включённой вытяжкой.
- В лаборатории категорически запрещается хранить продукты питания и принимать пищу.
- При выполнении опытов необходимо использовать только чистую и чистую лабораторную посуду.
- На любой посуде, в которой хранятся реактивы, должны быть этикетки с указанием названия веществ.

– Вещества не должны попадать на кожу лица и рук, так как они могут вызвать раздражение кожи и слизистых оболочек.

– Твёрдые химические реактивы можно брать только шпателем, пинцетом или ложечкой. Категорически запрещается брать реактивы руками!

– Работу с кислотами, твёрдыми щелочами, едкими и токсичными веществами следует проводить только в защитных очках и перчатках. При растворении твёрдых щелочей в воде необходимо добавлять щёлочь небольшими порциями в воду, избегая перегревания раствора. Разбавление кислот или щелочей необходимо производить в жаростойкой посуде.

– При разбавлении концентрированных кислот и щелочей необходимо небольшими порциями при постоянном перемешивании приливать кислоту (или концентрированный раствор щёлочи) в воду, а не наоборот.

– Растворение кислот и щелочей в воде сопровождается выделением большого количества теплоты, что может привести к закипанию смеси, её разбрызгиванию и попаданию в глаза, на лицо и руки.

– Вещества в лаборатории категорически запрещается пробовать на вкус. Для определения запаха вещества нужно ладонью руки сделать движение от отверстия сосуда к носу и осторожно (не полной грудью!) вдохнуть.

– При ожоге кислотой необходимо немедленно промыть пораженное место большим количеством воды, а затем двухпроцентным раствором соды.

– При ожоге щёлочью необходимо длительное промывание поражённого места под струёй воды, а затем однопроцентным раствором борной или уксусной кислоты.

– При ожоге глаз кислотой или щёлочью необходимо немедленно промыть глаза водой в течение длительного времени и в случае необходимости обратиться к врачу.

– После завершения работы необходимо привести рабочее место в порядок, использованную лабораторную посуду следует помыть.

3 Экспериментальная часть

В данном разделе методических указаний рассматриваются методы химического анализа для определения состава отложений с внутренних поверхностей нагрева теплосилового оборудования [4–7].

В зависимости от состава отложений перевод отобранной пробы в растворимое состояние производится обработкой ее водой, соляной кислотой, царской водкой или сплавлением со щелочью.

Отложения, образующиеся в трубках пароперегревателей и проточной части турбин, в основном состоят из водорастворимых соединений натрия, а также содержат нерастворимые в воде силикаты и продукты коррозии.

Отложения, образующиеся при нагревании воды в трубках конденсаторов турбин и различных подогревателей, так называемые низкотемпературные накипи, обычно нерастворимы в воде, но разлагаются соляной кислотой или царской водкой.

Отложения, образующиеся на внутренних поверхностях нагрева котлов, значительная часть которых нерастворима в кислотах, для перевода в растворимое состояние подвергаются сплавлению со щелочью.

На рисунке 1 приведена общая структурная схема выполнения химического анализа.

3.1 Общие требования к проведению анализов

1) При проведении анализов все взвешивания (навесок отложений, навесок веществ для приготовления стандартных растворов, осадков) проводят на аналитических весах с ценой деления шкалы 0,0001 г.

2) Для анализа используют аналитические пробы отложений с размером частиц менее 0,2 мм.

3) Одновременно с анализом пробы отложений через все стадии анализа проводят холостой опыт (без пробы) для внесения в результат определения поправки, учитывающей содержание определяемых элементов в реактивах.

4) Все применяемые реактивы, если не указано иное, должны иметь степень чистоты не ниже ч.д.а.

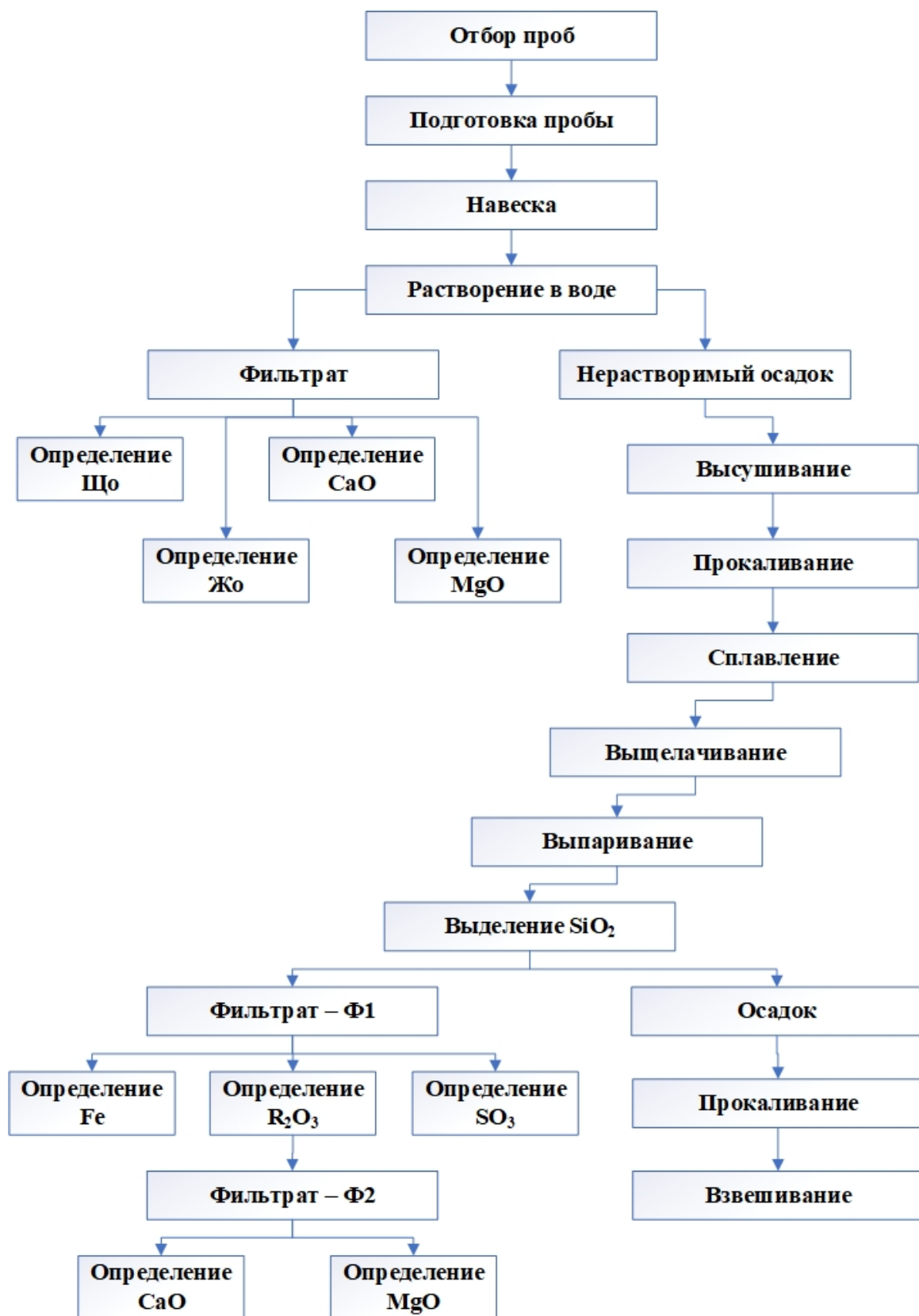


Рис. 1. Общая структурная схема химического анализа

5) Для приготовления растворов и при выполнении анализа используют дистиллированную воду по ГОСТ Р 58144-2018 или воду для лабораторного анализа по ГОСТ Р 52501-2005 [8, 9].

6) Стекланную лабораторную посуду, а также фарфоровые выпарительные чашки тщательно моют, при необходимости с применением специальных моющих составов для лабораторной посуды, споласкивают дистиллированной водой и высушивают на воздухе.

7) Платиновые тигли после использования кипятят в разбавленном растворе соляной кислоты, после чего тщательно моют, споласкивают дистиллированной водой и прокаливают при температуре 900–950 °С. Хранят в эксикаторе.

8) Пронумерованные и вымытые фарфоровые тигли прокаливают при температуре 800–825 °С до постоянной массы. Хранят в эксикаторе.

9) Определение содержания элементов проводят параллельно из двух навесок отложений. За окончательный результат анализа принимают среднеарифметическое значение результатов двух определений, если расхождение между ними не превышает максимально допустимого (предела повторяемости).

Если расхождение между результатами двух определений превышает максимально допустимое расхождение, то проводят третье определение и за окончательный результат принимают среднеарифметическое двух наиболее близких результатов определений, находящихся в пределах допустимых расхождений. Если результат третьего определения находится в пределах допустимого расхождения по отношению к обоим результатам предыдущих определений, то за окончательный результат принимают среднеарифметическое результатов трех определений.

3.2 Отбор проб

Пробы отложений должны быть отобраны по возможности сразу после вскрытия оборудования, но не позднее первых суток.

При отборе проб оценивают количество, расположение, цвет, плотность, прочность связи с металлом и прочие характерные особенности

отложений, а также коррозионные и эрозионные повреждения металла. Результаты записывают в журнал осмотров теплосилового оборудования. Отбор проб отложений выполняют при помощи скальпеля, перочинного ножа или особых скребков, изготовленных из обычной стали в форме ложки по профилю лопаточного аппарата каждой ступени или ряда ступеней. При снятии отложений под очищаемую лопатку подставляют кусочек кальки или глянцевой бумаги, согнутой желобком. Снятые отложения по возможности без потерь ссыпают в пакетики из кальки или в предварительно высушенные и взвешенные бюксы, причем в каждый бюкс помещают отложения только с одной ступени. Пакеты из кальки с пробами хранят в эксикаторе с прокаленной CaO .

Пробы следует отбирать в количестве не менее 2,0 г. Отобранные пробы переносят в лабораторию и взвешивают.

Данные заносят в журнал осмотра теплосилового оборудования.

Особо прочно связанные с металлом отложения можно снять путем сжатия участка трубы в тисках. Для этого участок трубы длиной 10 см с очищенной наружной поверхностью разрезают вдоль на огневую и тыльную половины, затем одну из них закрепляют в тисках и скребком очищают рыхлые отложения, собирая их в отдельный бюкс или пакет. После этого закрывают отрезок трубы плотным листом бумаги и постепенно сильно сжимают тиски. При снятии металла отложения отскакивают, их пересыпают в другой пакет или бюкс.

3.3 Подготовка пробы

Пробу отложений первоначально грубо измельчают, квартованием сокращают до нескольких граммов и растирают в агатовой или яшмовой ступке. Котельные отложения измельчают тщательно до мелкодисперсного состояния («пудры»).

Если при осмотре и измельчении пробы обнаруживаются частички сварочного грата, металлической стружки или иные загрязнения, их удаляют вручную. При этом нельзя пользоваться магнитом, так как окислы железа, содержащиеся в отложениях, также извлекаются магнитом.

3.4 Определение потери или увеличения массы при прокаливании

В результате прокаливания масса накипи может уменьшиться или увеличиться. Уменьшение массы происходит вследствие потери массовой доли влаги, сгорания органических веществ, разложения карбонатов и т. д. Увеличение массы вызывается окислением кислородом воздуха закиси железа и металлической меди до их окислов.

Точную массу навески (0,5–1 г) отложений помещают в прокаленный и взвешенный фарфоровый тигель и прокаливают в муфельной печи при температуре 800–850 °С до постоянной массы.

Если при этой температуре отложения плавятся, то берут новую массу навески и прокаливают при температуре 600 °С.

Тигель с массой навески устанавливают в холодную муфельную печь, постепенно повышая температуру до указанной, после чего прокаливают в течение 2–3 часов. Тигель с прокаленной массой навески охлаждают в эксикаторе, взвешивают и прокаливают вторично в течение 1 ч. Если масса изменится более чем на 0,5 мг, пробу прокаливают дополнительно.

Потерю при прокаливании вычисляют по формуле:

$$\text{ПП} = (B_1 - B_2) \cdot \frac{100}{B}, \quad \%, \quad (1)$$

где B_1 – масса тигля с навеской до прокаливания, г;

B_2 – масса тигля с навеской после прокаливания, г;

B – масса навески накипи, г.

Если имеется привес, его вычисляют, подставляя в формулу (1) разность $(B_2 - B_1)$. Результаты расчетов необходимо занести в таблицу 1.

Таблица 1

Изменение массы навески после прокаливания

Наименование пробы	Масса навески, B , г	Масса тигля с навеской до прокаливания, B_1 , г	Масса тигля с навеской после прокаливания, B_2 , г	Изменение массы навески, ПП, %

3.5 Анализ водорастворимой части пробы отложений

Перечень лабораторного оборудования, посуды и реактивов:

- электроплитка;
- мерная колба на 500 см³;
- стакан на 200–250 мл;
- стеклянная палочка;
- бумажный беззольной фильтр белая лента;
- дистиллированная вода.

Проведение анализа:

1) На аналитических весах взвесить 1,0000 г ($\pm 0,0002$ г) анализируемой пробы отложений.

2) Навеску отложений поместить в химический стакан объёмом 250 мл, влить в него 50 см³ горячей дистиллированной воды, стеклянной палочкой размешать навеску и нагреть раствор до слабого кипения, кипятить на слабом огне в течение 10–15 мин, периодически помешивая.

3) Содержимое стакана количественно перевести в мерную колбу вместимостью 500 см³, смывая туда оставшиеся частички отложений со стенок стакана струей горячей дистиллированной воды. Жидкости в закрытой колбе дают остыть, после чего доливают до метки дистиллированной водой, содержимое колбы периодически тщательно перемешивают и оставляют отстаиваться.

4) Если нет полного осветления жидкости, то анализы выполняют из отфильтрованной пробы. Для этого пробу фильтруют через бумажный фильтр белая лента.

5) После фильтрования получается фильтрат и нерастворимый остаток. В фильтрате определяем щелочность, жесткость, кальций, магний и железо.

6) Нерастворимый остаток высушиваем и используем для сплавления и последующего определения оксидов кремния, железа, кальция, магния, полуторных окислов и серы.

3.5.1 Определение щелочности

Показатель щелочности указывает на присутствии в отложениях карбонатов и бикарбонатов кальция, магния и железа. Сущность метода определения щелочности состоит в нейтрализации щелочных компонентов соляной кислотой в присутствии индикаторов фенолфталеина и метилоранжа.

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- титровальная установка (штатив с бюреткой (цена деления бюретки 0,1 мл.);
- коническая колба емкостью 250–300 мл;
- мерный цилиндр емкостью 100 мл.

Растворы:

- раствор соляной кислоты 0,1 Н;
- 1 % раствор фенолфталеина;
- 0,1 % раствор метилоранжа.

Проведение анализа:

В коническую колбу емкостью 250 мл отмерить мерным стаканом (на 100 мл) исследуемую пробу, добавляют 2–3 капли фенолфталеина и окрасившийся в розовый цвет раствор титруют 0,1 Н раствором соляной кислоты до обесцвечивания; отмечают расход кислоты на титрование. Если же после введения фенолфталеина раствор не окрасится в розовый цвет, это указывает на отсутствие в растворе гидратов и карбонатов. Затем к пробе добавляют 2 капли метилоранжа и получившийся желтого цвета раствор титруют же 0,1 Н раствором соляной кислоты до перехода окраски в оранжевую. Замечают общий расход кислоты на титрование (включая и расход на титрование с фенолфталеином). Титрование ведут при интенсивном перемешивании.

Величину общей щелочности вычисляют по формуле:

$$\text{Щ}_o = \frac{(H \cdot a)}{V \cdot 1000} = \frac{(0,1 \cdot a)}{100 \cdot 1000}, \text{ мг-экв/л,} \quad (2)$$

где Н – нормальность раствора соляной кислоты (Н=0,1);

а – расход соляной кислоты, пошедшей на титрование, мл;

V – объем пробы, взятой для анализа, мл.

3.5.2 Определение жесткости (суммарной массовой доли кальция и магния)

Определению массовой доли кальция и магния (жесткости J_0) в исходных растворах отложений титрованием Трилоном Б в аммиачной буферной среде ($pH=9-10$) с хромовыми металлными индикаторами мешает наличие железа, меди, цинка, алюминия, марганца, никеля и др.

Образующийся осадок гидроксида железа не титруется Трилоном Б, но мешает отмечать изменение окраски индикатора. Ионы цинка количественно титруются совместно с кальцием и магнием. Медь и никель образуют с хромовыми индикаторами более прочные комплексы, чем кальций и магний, затягивая переход окраски индикатора в эквивалентной точке.

Мешающее влияние указанных веществ устраняется введением диэтилдитиокарбамата натрия, с которым они образуют труднорастворимые соединения.

Метод позволяет определять массовую долю кальция и магния 0,01 мг-экв в пробе с относительной ошибкой 10–15 %.

Реактивы:

- Трилон Б, 0,05 М раствор;
- аммиачный буферный раствор;
- раствор индикатора кислотного хром темно-синего;
- диэтилдитиокарбамат натрия кристаллический.
- соляная кислота, раствор 1:1;
- аммиак, раствор 1:1.

Проведение анализа:

1) Отбирают в коническую колбу 10 см³ исходного раствора отложений, прибавляют 3–5 капель соляной кислоты, затем 0,3–0,5 г кристаллического диэтилдитиокарбамата натрия.

2) Доводят дистиллированной водой до 100 см³, проверяют pH (по индикаторной бумаге) и, если требуется, доводят его до значения 7–9, добавляя раствор аммиака. Затем добавляют 5 см³ аммиачного буферного раствора, 5–7 капель индикатора кислотного хром темно-синего и титруют раствором Трилона Б до изменения окраски из красной в сине-

сиреневую. Если образовавшийся осадок диэтилдитиокарбаматов мешает четко отметить переход окраски, то после добавления диэтилдитиокарбамата натрия проверяют значение pH полученного раствора (по индикаторной бумаге) и во избежание получения заниженных результатов анализа, что наблюдается главным образом при наличии фосфатов, подкисляют раствор соляной кислотой до pH=2–3. Затем осадок отделяют фильтрованием раствора через беззольный фильтр.

3) Фильтр с осадком промывают несколько раз дистиллированной водой, объем фильтрата доводят до 100 см³ и продолжают анализ, как указано выше.

4) Когда суммарная массовая доля кальция и магния невелика и определять отдельно кальций и магний нецелесообразно, их общую массовую долю в пересчете на оксид кальция вычисляют по формуле:

$$\text{CaO} = \frac{a \cdot M \cdot K \cdot 56,08 \cdot V_{\text{исх}} \cdot 100}{V_{\text{пр}} \cdot B \cdot 1000}, \quad \% \quad (3)$$

где a – расход Трилона Б на титрование, см³;

M – молярность раствора Трилона Б;

K – поправочный коэффициент молярности, $K=1$;

56,08 – молекулярная масса CaO;

B – масса навеска, г;

$V_{\text{исх}}$ – общий объем исходного раствора отложений, см³;

$V_{\text{пр}}$ – объем исходного раствора отложений, взятый для анализа, см³.

3.5.3 Последовательное определение массовой доли кальция и магния

Раздельное определение массовой доли кальция и магния в одной пробе основано на том, что в сильнощелочной среде (pH=12–13), создаваемой введением едкого натра, магний осаждается в виде гидроксида, а кальций остается в растворе и оттитровывается Трилоном Б.

После определения кальция введением соляной кислоты понижают значение pH раствора до 8–9. При этом магний опять переходит в раствор. Затем добавляют аммиачный буферный раствор и определяют массовую долю магния титрованием Трилоном Б.

Когда массовая доля магния невелика, определять отдельно массовую долю кальция и магния нецелесообразно, так как это не имеет существенного значения, а результаты определения могут иметь значительную погрешность.

Зная значение общей жесткости (сумма кальция и магния) и определив значение кальция можно определить значение магния путем вычитания из J_0 содержание кальция.

Для определения *содержания кальция* пробу титруют 0,1 Н Трилоном Б в присутствии индикатора кислотного хром темно синего в щелочной среде.

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- титровальная установка (штатив с бюреткой на 25 мл (цена деления бюретки 0,1 мл);
- коническая колба емкостью 250 мл;
- Трилон Б, 0,05 М концентрации.

Растворы:

- едкий натр, 2 Н раствор;
- кислотный хром темно синий (раствор-индикатор).

В коническую колбу отбирают мерным цилиндром 100 мл пробы. Прибавляют 2 мл 2 Н раствора едкого натра, несколько капель индикатора кислотного хром темно синего и сразу титруют 0,1 Н раствором Трилона Б до перехода окраски из вишневого розового в фиолетово-голубой. Записывают расход 0,05 М Трилона (a , мл).

Содержание кальций-ионов в исследуемой пробе вычисляют по формуле:

$$\text{CaO} = \frac{a_1 \cdot M \cdot K \cdot 56,08 \cdot V_{\text{исх}} \cdot 100}{V_{\text{пр}} \cdot B \cdot 1000}, \quad \%, \quad (4)$$

где a_1 – расход Трилона Б на титрование кальция, см³;

Далее определяем *содержание магния* (при необходимости).

В раствор, в котором определяли кальций добавить 1 Н раствор соляной кислоты (1,5–2,5 мл) (pH≈8–9), прибавляют 5 мл аммиачно-буферного раствора, 0,5 ложечки сухой смеси эриохрома-черного Т и титруют до перехода розового-вишневого цвета в синий.

Содержание магний-ионов (массовой доли) в исследуемой пробе вычисляют по формуле:

$$\text{MgO} = \frac{a_2 \cdot M \cdot K \cdot 40,32 \cdot V_{\text{исх}} \cdot 100}{V_{\text{пр}} \cdot B \cdot 1000}, \%, \quad (5)$$

где a_2 – расход рабочего раствора Трилона Б на титрование магния, см³;

40,32 – молекулярная масса MgO.

Результаты химического анализа записывают в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты химического анализа последовательного определения массовой доли кальция и магния

Наименование пробы	Масса навески, В, г	Расход Трилона Б на титрование		Массовая доля, %	
		кальция, a_1 см	магния, a_2 см	CaO	MgO

3.6 Анализ нерастворимой части пробы отложений

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- весы класса точности I по ГОСТ OIML R 76-1-2011 с ценой деления шкалы 0,1 мг [10];
- печь муфельная с максимальной температурой нагрева 1100 °С, с естественной или принудительной вентиляцией;
- шкаф сушильный с электронагревом и терморегулятором;
- баня водяная или песчаная с регулируемым нагревом;
- электронагреватель с закрытой спиралью;
- тигли конические из платины № 100-7 или № 100-8 с крышками № 101-8 или № 101-9 по ГОСТ 6563-2016 [11];
- колбы мерные 2-250-2 или 2а-250-2 по ГОСТ 1770-74 [12];
- стаканы В-1-100 ТХС, В-1-150 ТХС, В-1-600 ТХС, В-1-1000 ТХС по ГОСТ 25336-82 [13].
- цилиндры мерные 1-5-2, 1-10-2, 1-50-2, 1-100-2 по ГОСТ 1770-74 [12];
- пипетка с одной отметкой 2-2-5 по ГОСТ 29169-91 [14];

- пипетки градуированные 2-2-2-2 по ГОСТ 29227-91 [15];
- ступка с пестиком яшмовая или агатовая;
- воронка В-100-150 ХС, В-75-110 ХС по ГОСТ 25336-82 [13].
- щипцы тигельные с платиновыми наконечниками;
- стеклянные палочки с расплюснутым концом;
- фильтры «синяя лента» и «белая лента».

Реактивы:

- кислота соляная, концентрированная по ГОСТ 3118-77 плотностью 1,15–1,19 г/см [16];
- водорода пероксид по ГОСТ 10929-76, ч.д.а. (содержание перекиси 29–32 %) [17];
- желатин пищевой по ГОСТ 11293-2017 [18];
- серебро азотнокислое по ГОСТ 1277-75 [19];
- натрия карбонат по ГОСТ 83-79 [20].

Подготовка пробы отложений к анализу:

Полученную по п. 3.5 (смотрите абзац 6) пробу отложений растирают в агатовой ступке до крупности не более 0,063 мм. Готовую пробу хранят в закрытой стеклянной емкости.

Проведение анализа:

Сплавление: на дно тигля поместить 1 г соды (NaCO_3) затем добавить навеску, предварительно взвешенную с точностью до 0,0001 мг и 5 г соды. Аккуратно перемешать соду с навеской, не касаясь дна тигля и сверху покрыть смесь одним граммом соды. Тигель должен быть заполнен не более чем на 1/3. Записывают номер тигля и наименование пробы, помещенной в тигель.

Тигель с содержимым помещают в холодную муфельную печь. Температуру печи постепенно повышают до 950 °С и сплавляют смесь при этой температуре в течение 25–30 мин до получения однородной прозрачной массы. Затем раскаленный тигель вынимают с помощью щипцов и погружают в холодную воду так, чтобы смачивалась только его внешняя поверхность.

Примечание: допускается для облегчения растворения плава охлаждать раскаленный тигель на воздухе, вращая его в наклонном положении и равномерно распределяя остывающий плав по стенкам тигля.

Выщелачивание: остывший тигель обмывают снаружи дистиллированной водой и переносят в стеклянный стакан объёмом 250 мл. Приливают, 100 см³ горячей воды, 25 см³ концентрированной соляной кислоты, 2–3 капли раствора пероксида водорода.

После полного растворения плава, извлекают щипцами тигель, тщательно ополаскивают водой.

Примечание: если в стакане видны неразложившиеся частицы, то анализ прекращают и проводят новый анализ с уменьшенной навеской.

Выпаривание: раствор в стакане выпаривают на песчаной бане до получения влажных солей, осторожно растирая стеклянной палочкой с расплюснутым концом образующиеся комочки.

Далее выделяют кремниевую кислоту коагуляцией желатином.

3.6.1 Выделение оксида кремния

К содержимому стакана приливают 20–25 см³ концентрированной соляной кислоты, выдерживают 15 минут перемешивая. Затем приливают 100 см³ горячей дистиллированной воды и 10 см³ горячего свежеприготовленного 1 %-ного раствора желатина.

Содержимое стакана перемешивают стеклянной палочкой и выдерживают при температуре 70–80 °С на водяной бане в течение 5–10 мин.

В предварительно подготовленные колбы (пронумерованные) вместимостью 250 см³ вставляют воронки с фильтром белая лента и фильтруют раствор с выделившимся осадком.

После окончания фильтрования, стакан тщательно промывают небольшими порциями горячей воды, чтобы все содержимое стакана осталось на фильтре.

Затем промывают осадок горячей водой до отрицательной реакции на ион хлора (реакция с раствором азотнокислого серебра – на часовое стекло капнуть несколько капель фильтрата, затем каплю азотнокислого серебра, если не появляется белого осадка, значит остаток на фильтре промыт).

После остывания раствора (Ф1, рис. 1), его доводят дистиллированной водой до метки и определяю оксиды железа, серы и сумму полуторных окислов.

Фильтр с осадком во влажном состоянии переносят в предварительно взвешенный фарфоровый тигель и помещают в холодную муфельную печь. Печь разогревают до 1000 °С и выдерживают тигли в течении 30 минут. Вынимают из печи, остужают до комнатной температуры и взвешивают. Результаты записывают в таблицу 3, а содержание SiO₂ определяют по формуле:

$$\text{SiO}_2 = \frac{m_1 - m}{m_0} \cdot 100, \% \quad (6)$$

где m_1 – масса тигля с осадком, г;

m – масса пустого тигля, г;

m_0 – исходная навеска при сплавлении, г.

Таблица 3

Результаты химического анализа определения SiO₂

Наименование пробы	Навеска, m_0 , г	Вес пустого тигля, m , г	Вес тигля с осадком, m_1 , г	Содержание SiO ₂ , %

3.6.2 Определение массовой доли железа

Метод основан на образовании яркоокрашенного комплекса трехвалентного железа с сульфосалициловой кислотой в кислой среде, разрушении этого комплекса при титровании раствором ди-Na-ЭДТА (Трилон Б) с образованием слабоокрашенного комплексного соединения трехвалентного железа с ди-Na-ЭДТА. Массовую долю оксида железа (III) устанавливают по количеству раствора ди-Na-ЭДТА, пошедшего на титрование.

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- электронагреватель;
- термометр;
- стакан на 500 мл;
- пипетка;
- индикаторная лакмусовая бумага;

Растворы:

- аммиак, 10 % раствор;

- аммоний хлористый, 20 % раствор;
- аммоний азотнокислый, 2 % раствор;
- сульфосалициловая кислота, 10 % раствор;
- ди- Na -ЭДТА (Трилон Б) – 0,05 моль/дм³.

Проведение анализа:

С помощью пипетки отбирают аликвоту основного раствора (Ф1, рис. 1) 20 см³, переносят в коническую колбу объёмом 250 см³ и приливают 80 см³ дистиллированной воды до общего объема раствора 100 см.

Раствор в колбе при постоянном перемешивании нейтрализуют раствором гидроксида аммония 1:1 до появления устойчивого помутнения.

Добавляют по каплям при перемешивании раствор соляной кислоты 1:1 до рН=1,4–1,8, контролируя рН с помощью индикаторной бумаги. Затем мерной пипеткой приливают 2–3 см раствора сульфосалициловой кислоты. Раствор в конической колбе нагревают на электронагревателе до 60–80 °С, контролируя температуру с помощью термометра, и в горячем состоянии титруют из бюретки 0,05 моль/дм³ раствором Трилона Б, тщательно перемешивая раствор, до обесцвечивания красно-фиолетовой окраски или перехода ее в зеленовато-желтую, в зависимости от содержания железа.

Массовую долю оксида железа (III), %, вычисляют по формуле:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = V \cdot K \cdot \frac{0,00399}{m_3}, \% \quad (7)$$

где V – объем раствора Трилона Б, израсходованный на титрование, см³;

K – поправочный коэффициент к концентрации раствора Трилона Б, $K = 1$;

0,00399 – масса оксида железа (III), эквивалентная массе Трилона Б, содержащейся в 1 см раствора концентрацией 0,05 моль/дм³;

m_3 – масса навески, соответствующая аликвоте основного раствора, отобранной для определения оксида железа, г, вычисленная по формуле:

$$m_3 = \frac{m \cdot V_1}{V_2}, \text{ г} \quad (8)$$

где m – масса навески, г;

V_1 – объем аликвоты основного раствора, отобранной для определения оксида железа, $V_1 = 20$ см³;

V_2 – общий объем основного раствора, $V_2 = 250$ см³.

Результаты анализа вносятся в таблицу 4.

Таблица 4

Результаты химического анализа определения оксида железа

Наименование пробы	Масса навески, m_3 , г	Объем раствора Три- лона Б, израсходован- ный на титрование, V , см ³	Массовая доля Fe_2O_3 , %

3.6.3 Определение триоксида серы

Метод основан на осаждении сульфат-ионов раствором хлорида бария в солянокислой среде в виде сульфата бария и определении массы осадка (гравиметрический метод). Мешающие элементы маскируют раствором Трилона Б.

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- весы аналитические;
- печь муфельная с максимальной температурой нагрева 900 °С, с естественной или принудительной вентиляцией камеры в минуту, терморегулятором с программируемым режимом нагрева, обеспечивающая устойчивую температуру нагрева (800±15) °С;
- колбы мерные 2-100-2, 2-500-2, 2-1000-2 или 2а-100-2, 2а-500-2, 2а-1000-2 по ГОСТ 1770-74 [12];
- стаканы В-1-400, В-1-600 ТХС, ТХС В-1-1000 ТХС по ГОСТ 25336-82 [13].
- цилиндры стеклянные 1-5-2, 1-50-2, 1-100-2 по ГОСТ 1770-74 [12];
- пипетки 2-2-5, 2-2-10, 2-2-20, 2-2-50 по ГОСТ 29169-91 [14];
- баня водяная или песчаная с регулируемым нагревом;
- электронагреватель с закрытой спиралью;
- бумага фильтровальная ФМ-I по ГОСТ 12026-76 [21] или фильтры «синяя лента»;
- воронки В-75-110 ХС по ГОСТ 25336-82 [13];
- тигли из фарфора № 4 низкие по ГОСТ 9147-80 [22].

Растворы:

- хлорид бария, 10%-ный раствор;
- Трилон Б – 0,05 моль/дм³;
- азотнокислое серебро, 1%-ный раствор.

Проведение анализа:

От основного раствора Ф1 (рис. 1), с помощью пипетки отбирают аликвоту 50 см³, переносят ее в стакан вместимостью 350 см³ и добавляют воду до общего объема 250 мл. К раствору прибавляют 30 см³ раствора Трилона Б и кипятят в течение 2–3 минут.

Не прекращая нагревания, к раствору небольшими порциями при постоянном перемешивании приливают 10 см³ раствора хлорида бария. Раствор выдерживают при температуре, близкой к кипению, в течение 30 минут и отстаивают в течение 12–15 часов.

Содержимое стакана фильтруют через плотный фильтр «синяя лента», осадок сульфата бария на фильтре промывают горячей водой до полного удаления хлоридов (проба с раствором нитрата серебра).

В предварительно взвешенный тигель помещают фильтр с осадком сульфата бария, после чего прокаливают в муфельной печи при температуре (800±15) °С в течение 30 минут.

Тигель с остатком после прокаливания охлаждают до комнатной температуры и взвешивают.

Результаты записывают в таблицу 5, а массовую долю триоксида серы в %, вычисляют по формуле:

$$\text{SO}_3 = \frac{a \cdot (m_2 - m_1) \cdot 0,3429}{m}, \text{ \%}, \quad (9)$$

где a – фактор разбавления, $a = \frac{V_2}{V_1}$ (здесь V_1 – объем раствора, взятый для анализа, $V_1=50$ см³, а V_2 – общий объем основного раствора, $V_2=250$ см³);

m – масса навески, г;

m_1 – масса пустого тигля, г;

m_2 – масса тигля с осадком сульфата бария, г;

0,3429 – коэффициент пересчета сульфата бария на триоксид серы.

Таблица 5

Результаты химического анализа определения триоксида серы

Наименование пробы	Навеска, m , г	Вес пустого тигля, m_1 , г	Вес тигля с осадком, m_2 , г	Содержание SO_3 , %

3.6.4 Определение суммы полуторных окислов (суммы оксидов железа, алюминия и титана (R_2O_3))

Метод основан на регулировании концентрации водородных ионов анализируемого раствора, так как осаждение гидроксидов того или иного элемента происходит только при определенных интервалах величины рН раствора.

Так, например, осаждение гидроксида алюминия начинается при рН=3 и заканчивается при рН=6,5. При этом следует заметить, что при избытке аммиака происходит обратная реакция – растворение гидроксида алюминия. Минимальная растворимость $Al(OH)_3$ находится в пределах рН=6,5–7,5; при рН=9 растворимость $Al(OH)_3$ становится значительной.

Гидроксид железа (III) – $Fe(OH)_3$ начинает осаждаться еще до наступления щелочной среды, растворимость $Fe(OH)_3$ в аммиаке незначительна.

Гидроксид титана $Ti(OH)_4$ в избытке аммиака не растворяется.

Выделенные осаждением аммиаком гидроксиды $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Ti(OH)_4$ прокаливаются и взвешиваются в виде суммы оксидов $\Sigma Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2$.

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- электронагреватель;
- весы лабораторные;
- стакан на 250 мл;
- мерная колба на 250 мл;
- фарфоровый тигель;

- пипетка;
- бумажный обеззоленный фильтр».

Растворы:

- хлористый аммоний, 20 % раствор;
- азотнокислый аммоний, 2 % раствор.

Проведение анализа:

Из мерной колбы, в которой находится фильтрат после отделения кремниевой кислоты (Ф1, рис. 1) отбирают пипеткой аликвотную часть 100 мл раствора в стакан на 250 мл, добавляют 10 мл 20 % раствора хлористого аммония, нагревают до кипения и осаждают оксиды небольшими порциями аммиака до появления слабого запаха аммиака и появления рыжих или белых хлопьев. Раствор с осадком отфильтровывают горячим на беззольном фильтре белая лента в мерную колбу на 250 мл. Осадок промывают горячим 2 % раствором азотнокислого аммония до отрицательной реакции на ионы хлора. Фильтр с осадком помещают в фарфоровый тигель и озоляют в муфельной печи при температуре 1000 °С до достижения постоянной массы, после чего охлаждают и взвешивают. Результаты записывают в таблицу 6, а содержание суммы оксидов алюминия, железа и титана определяют по формуле:

$$R_2O_3 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 2.5}{m} \cdot 100, \%, \quad (10)$$

где m_2 – масса тигля с осадком, г;

m_1 – масса пустого тигля, г;

m – масса навески, г.

Таблица 6

Результаты химического анализа определения R_2O_3

Наименование пробы	Навеска, m , г	Вес пустого тигля, m_1 , г	Вес тигля с осадком, m_2 , г	Содержание R_2O_3 , %

Фильтрат после отделения осадка суммы оксидов алюминия, железа и титана (Ф2, рис. 1) разбавляют холодной дистиллированной водой до отметки мерной колбы, тщательно перемешивают, закрывают пробкой и сохраняют до окончания работы. Из него ведут определения CaO и MgO.

3.6.5 Определение оксидов кальция и магния

Перечень лабораторного оборудования и посуды:

- коническая колба емкостью 500 мл;
- пипетка объемом 25 см³.

Растворы и реактивы:

- аммиачно-буферный раствор;
- Трилон Б, 0,025 Н концентрации;
- эриохром-черный Т (порошок);
- едкий натр, 1 Н раствор;
- мурексид (порошок);
- соляная кислота, 1 Н раствор.

Проведение анализа определения СаО:

Из колбы с фильтратом Ф2 (рис. 1) пипеткой на 25 см³ отобрать 25 мл раствора в коническую колбу емкостью 500 мл. Затем прилить 200 мл дистиллированной воды, 8 мл 20 %-ного раствора едкого натра и 0,1 г индикатора мурексида. Перемешать и титровать Трилоном Б до перехода окраски из розово красной в сиренево-фиолетовую. Чтобы лучше был виден переход окраски, можно приготовить холостую пробу (дистиллированная вода плюс внести все растворы при определении кальция. Поскольку в дистиллированной воде отсутствует кальций, окраска индикатора будет сразу сиренево-фиолетовая).

Содержание кальций ионов в исследуемой пробе вычисляют по формуле:

$$\text{СаО} = (V - V_x) \cdot T_{\text{тр/СаО}} \cdot \frac{2,5}{m}, \%, \quad (11)$$

где V – объем пробы, пошедший на титрование, см³;

V_x – объем пробы, пошедший на титрование холостой пробы, см³;

$T_{\text{тр/СаО}}$ – титр Трилона Б, в граммах СаО, $T_{\text{тр/СаО}} = 0,66$;

2,5 – коэффициент пересчета;

m – масса навески, взятой для анализа, г.

Проведение анализа определения MgO:

Из колбы с фильтратом Ф2 (рис. 1) пипеткой на 25 см³ отобрать 25 мл раствора в коническую колбу емкостью 500 см³. Затем прилить 100 мл дистиллированной воды, 15 мл аммиачно-буферного раствора и

0,1 г индикатора эриохрома-черного. Перемешать и титровать Трилоном Б до перехода окраски из вишневой в сине-зеленую. Чтобы лучше был виден переход окраски, можно приготовить холостую пробу (дистиллированная вода плюс внести все растворы при определении магния).

Содержание магний ионов в исследуемой пробе вычисляют по формуле:

$$\text{MgO} = (V - V_x) \cdot T_{\text{тр/MgO}} \cdot \frac{2,5}{m}, \% \quad (12)$$

где $T_{\text{тр/MgO}}$ – титр Трилона Б, в граммах MgO, $T_{\text{тр/MgO}}=0,48$.

Результаты химического анализа записывают в таблицу 7.

Таблица 7

Результаты химического анализа определения оксидов кальция и магния

Наименование пробы	Масса навески, m , г	Расход Трилона Б на титрование, V , мл		Содержание, %	
		кальция	магния	CaO	MgO

3.7 Обработка экспериментальных данных

Результаты выполненных химических анализов представляют в виде сводной таблицы 8.

Таблица 8

Химический состав исследуемой пробы

Наименование пробы	Содержание оксидов									Суммарной результат оксидов кальция и магния из пробы отложений
	Не растворимые в воде, %					Растворимые в воде, %				
	SiO ₂	R ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ж ₀	Щ ₀	

4 Содержание отчета о работе

После выполнения всех экспериментов и обработки их результатов, проводится оформление отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- введение;
- цель и задачи работы;
- краткое описание методик проведения экспериментов;
- формулы и расчеты;
- таблицы с основными данными и результаты анализов;
- выводы на основании полученных результатов;
- список использованных источников.

5 Контрольные вопросы

1. На какие группы подразделяются отложения по химическому составу?
2. Назовите причины появления отложений на внутренних поверхностях нагрева теплосилового оборудования.
3. Как правильно отобрать пробу отложений для анализа?
4. Как правильно подготовить пробу для анализа?
5. К какому типу отложений относится исследуемая Вами проба?
6. Как предупредить образование всех видов отложений и коррозионных повреждений на внутренних поверхностях теплоэнергетического оборудования?
7. Какой беззольный фильтр следует использовать при фильтровании осадка кремневой кислоты?
8. Какой жидкостью эффективнее промывать осадок полуторных оксидов?
9. Какая информация указывается на пакете при упаковке проб?
10. От чего необходимо предохранять вырезанные образцы труб из котла?
11. Какие условия должны соблюдаться во время разрезания труб на фрезерном или продольно-строгальном станке в присутствии представителя химического цеха?
12. Каким способом и с помощью каких инструментов происходит снятие отложений?

Список литературы

1. Петрова Т.И. Физико-химические процессы в водном теплоносителе электростанций : учебник / Т.И. Петрова, В.Н. Воронов, Ф.В. Дяченко. – Москва : НИУ МЭИ, 2021. – 384 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/307247>.
2. Воронов В.Н. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС : учебное пособие / В.Н. Воронов, Т.И. Петрова. – Москва : Изд-во МЭИ, 2009. – 240 с.
3. Ларин Б.Л. Химия водного теплоносителя : учебное пособие / Б.Л. Ларин. – Иваново : ИГЭУ, 2021. – 232 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/296183>.
4. Жуков А.Ф. Химические методы анализа : учебное пособие / А.Ф. Жуков, В.В. Кузнецов, О.Л. Саморукова, А.Р. Тимербаев ; под редакцией О.М. Петрухина, Л.Б. Кузнецовой. – Москва : Лаборатория знаний, 2023. – 481 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/266441>.
5. МУ 34-70-102-85 (РД 34.37.301) Методические указания по химическому анализу отложений с внутренних поверхностей нагрева турбин. – Москва : СПО Союзтехэнерго, 1985. – 40 с.
6. ГОСТ Р 59592-2021 Топливо твердое минеральное. Методы определения химического состава золы. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 35 с.
7. СО 34.37.306-2001 (РД 153-34.1-37.306-2001) Методические указания по контролю состояния основного оборудования тепловых электрических станций. – Москва : ОАО «ВТИ», 2003. – 45 с.
8. ГОСТ Р 58144-2018 Вода дистиллированная. Технические условия. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 17 с.
9. ГОСТ Р 52501-2005 Вода для лабораторного анализа. Технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2006. – 13 с.
10. ГОСТ OIML R 76-1-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метро-

логические и технические требования. Испытания. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 134 с.

11. ГОСТ 6563-2016 Изделия технические из благородных металлов и сплавов. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 53 с.

12. ГОСТ 1770-74 Посуда мерная лабораторная стеклянная. Цилиндры, мензурки, колбы, пробирки. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 22 с.

13. ГОСТ 25336-82 Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 103 с.

14. ГОСТ 29169-91 Посуда лабораторная стеклянная. Пипетки с одной отметкой. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 9 с.

15. ГОСТ 29227-91 Посуда лабораторная стеклянная. Пипетки градуированные. Часть 1. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 10 с.

16. ГОСТ 3118-77 Реактивы. Кислота соляная. Технические условия. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 14 с.

17. ГОСТ 10929-76 Реактивы. Водорода пероксид. Технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 12 с.

18. ГОСТ 11293-2017 Желатин. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 40 с.

19. ГОСТ 1277-75 Реактивы. Серебро азотнокислое. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 11 с.

20. ГОСТ 83-79 Реактивы. Натрий углекислый. Технические условия. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 12 с.

21. ГОСТ 12026-76 Бумага фильтровальная лабораторная. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 7 с.

22. ГОСТ 9147-80 Посуда и оборудование лабораторные фарфоровые. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 22 с.

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТЛОЖЕНИЙ С ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Физико-химические процессы и теплообмен в элементах
энергетического оборудования», для студентов I–II курсов, обучающихся по
направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Составители

ВИЗГАВЛЮСТ Наталья Викторовна
ЧЕРКАШИНА Галина Анатольевна
БУВАКОВ Константин Владимирович