

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Химический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

И.о. декана

А. С. Князев

Оценочные материалы по дисциплине

Адсорбционные процессы

по направлению подготовки

**04.03.01 Химия**

Направленность (профиль) подготовки:

**Химия**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Бакалавр**

Год приема

**2023**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

В.В. Шелковников

Председатель УМК

Л.Н. Мишенина

Томск – 2023

## **1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен анализировать и интерпретировать результаты химических экспериментов, наблюдений и измерений.

ОПК-2 Способен проводить с соблюдением норм техники безопасности химический эксперимент, включая синтез, анализ, изучение структуры и свойств веществ и материалов, исследование процессов с их участием.

ПК-1 Способен выбирать и использовать технические средства и методы испытаний для решения исследовательских задач химической направленности, поставленных специалистом более высокой квалификации.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Систематизирует и анализирует результаты химических экспериментов, наблюдений, измерений, а также результаты расчетов свойств веществ и материалов.

ИОПК 1.2 Предлагает интерпретацию результатов собственных экспериментов и расчетно-теоретических работ с использованием теоретических основ традиционных и новых разделов химии.

ИОПК 1.3 Формулирует заключения и выводы по результатам анализа литературных данных, собственных экспериментальных и расчетно-теоретических работ химической направленности.

ИОПК 2.3 Проводит стандартные операции для определения химического и фазового состава веществ и материалов на их основе.

ИПК 1.1 Планирует отдельные стадии исследования при наличии общего плана НИР.

ИПК 1.3 Выбирает технические средства и методы испытаний (из набора имеющихся) для решения поставленных задач НИР.

ИПК 1.4 Готовит объекты исследования.

## **2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля:

- домашние задания;
- контрольная работа;
- коллоквиумы;
- индивидуальное задание.

Домашние задания (ИОПК 1.2, ИОПК 1.3, ИОПК 2.3., ИПК 1.1, ИПК 1.3)

Тексты задач для выполнения домашних заданий и самостоятельной работы приведены в полном объеме в пособии Минакова Т. С. Адсорбционные процессы на поверхности твердых тел: учебное пособие / Т. С. Минакова; Том. гос. ун-т. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2007. – 279 с.

Критерии оценивания:

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если выполнено более 70 % от домашней работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если выполнено менее 70 % от домашней работы.

Контрольная работа (ИОПК 1.2, ИОПК 1.3, ИПК 1.2)

Контрольная работа состоит из 3 задач, на решение которых выделяется 1,5 ч.

Примеры задач:

1. Имеются следующие данные по адсорбции СО на древесном угле при 273 К:
- | р мм рт ст | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

V, см<sup>3</sup>            10,2        18,6        25,5        31,4        36,9        41,6        46,1

Проверить, подчиняются ли эти данные уравнениям Ленгмюра, Тёмкина, Фрейндлиха и уравнению Ленгмюра для диссоциативной адсорбции. Найти коэффициенты соответствующих уравнений.

Охарактеризуйте адсорбционный процесс, представленный данной изотермой.

2. По изотерме адсорбции азота определить удельную поверхность адсорбента (T=77 К,

$S_0 = 16,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ), используя уравнения БЭТ и Ленгмюра для нахождения  $a_m$ :

p/p<sub>s</sub>            0,04        0,09        0,16        0,20        0,30

a, моль/кг        2,20        2,62        2,94        3,11        3,58

3. Рассчитать одним из методов энергию активации адсорбции кислорода на люминофоре Cd-(686)<sub>2</sub> и найти зависимость E<sub>Δs</sub> от величины адсорбции.

№ п/п	T опыта в °С	t в мин	a*10 <sup>-4</sup> ммоль/м <sup>2</sup>	№ п/п	T опыта в °С	t в мин	a*10 <sup>-4</sup> ммоль/м <sup>2</sup>
1	300	5	3,20	1	350	5	4,80
2		15	4,00	2		15	5,60
3		30	4,40	3		30	6,00
4		45	4,60	4		45	6,40
5		60	4,80	5		60	6,60
6		75	4,80	6		75	6,70
7		90	4,80	7		90	6,90
				8		105	6,90
				9		130	6,90

4. В таблице представлены данные по адсорбции метана на графитированной саже Р-33 при четырех температурах: 113, 123, 133, 143 К. Построить изотермы адсорбции для указанных температур, изостеры адсорбции в координатах lgP – 1/T, рассчитать теплоты адсорбции и найти их зависимость от величины адсорбции.

№ п/п	a, ммоль/г	113 К 1/T = 8.85·10 <sup>-3</sup>		123 К 1/T = 6.13·10 <sup>-3</sup>		133 К 1/T = 7.52·10 <sup>-3</sup>		143 К 1/T = 6.99·10 <sup>-3</sup>		q <sub>ist.</sub> кДж/моль
		P	lgP	P	lgP	P	lgP	P	lgP	
1	0.0075	0.28	-0.553	0.90	-0.046	2.18	0.339	5.15	0.712	14.0
2	0.010	0.38	-0.42	1.15	0.061	2.87	0.458	6.60	0.820	12.8
3	0.015	0.53	-0.276	1.59	0.201	4.08	0.611	9.35	0.971	12.8
4	0.020	0.66	-0.181	1.98	0.287	5.20	0.716	12.16	1.085	13.0
5	0.030	0.87	-0.061	2.68	0.428	7.20	0.857	17.35	1.239	13.4
6	0.050	1.19	0.076	4.00	0.602	11.4	1.057	28.8	1.459	14.3
7	0.080	2.13	0.328	7.90	0.898	24.3	1.386	64.3	1.808	15.2
8	0.100	5.50	0.740	20.4	1.310	65.0	1.813	170.0	2.230	15.3
9	0.110	14.4	1.158	48.0	1.681	146.0	2.163	340.0	2.532	14.2
10	0.120	50.5	1.703	128.0	2.106	325.0	2.512	645.0	2.810	11.5
11	0.130	119.0	2.076	266.0	2.425	542.0	2.734	–	–	9.5

5. При адсорбции этана на поверхности графитовой сажи степень заполнения θ=0,5 достигается при следующих значениях температуры и давления: 173 К, 2,15 торр и 188 К, 7,49 торр. Найти изостерическую теплоту адсорбции.

6. Определить энтальпию адсорбции окиси азота на фториде бария, если для адсорбции 4 см<sup>3</sup> газа при 233 К необходимо создать давление 40,7 торр, а при 273 К – 206,5 торр.

7. Вычислить площадь поверхности катализатора, 1 г которого при образовании монослоя адсорбирует при н.у. 83 г азота. Принять, что эффективная площадь, занятая молекулой азота, равна  $16,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ .

8. Удельная поверхность активированного угля  $400 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ . Плотность метанола при 288 К равна  $0,7958 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Определить максимальное количество метанола, которое может адсорбировать 1 г угля при 288 К при образовании мономолекулярного слоя.

Критерии оценивания:

Результаты контрольной работы определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется, если все задачи решены без замечаний и ошибок.

Оценка «хорошо» выставляется, если задачи решены с небольшими замечаниями или присутствуют незначительные ошибки в расчетах (калькуляция).

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если решено 2/3 от объема заданий контрольной работы, присутствуют нарушения в логике решения задач и расчетах.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если решено менее 2/3 от объема заданий контрольной работы, присутствуют значительные нарушения в логике решения задач и расчетах.

Коллоквиумы (ИОПК 1.1, ИПК 1.1, ИПК 1.2, ИПК 1.4)

Перечень теоретических вопросов:

1. Понятие сорбция. Пути развития и значение адсорбционных явлений.
2. Адсорбция. Классификация явления адсорбции (по границе раздела фаз, диссоциации, количеству адс. слоёв и т.д.).
3. Основные зависимости при адсорбции. Изотермы, изобары, изостеры адсорбции.
4. Критерии различия физической и химической адсорбции.
5. Природа сил и расчёт энергии физической адсорбции.
6. Методы расчёта хемосорбционных взаимодействий.
7. Экспериментальные методы изучения адсорбции.
8. Адсорбция на границе раздела газ – твёрдое тело.
9. Методы подготовки твердой поверхности к адсорбционным исследованиям.
10. Статические методы изучения адсорбции.
11. Динамические методы.
12. Адсорбция на границе раздела раствор – твёрдое тело.
13. Статические методы изучения адсорбции.
14. Динамические методы.
15. Адсорбция на границе раздела газ – раствор.
16. Термодинамика поверхностных явлений.
17. Метод Гиббса. Метод слоя конечной толщины. Сущность и сравнительная характеристика двух методов.
18. Теплота адсорбции. Классификация теплот адсорбции. Калориметрический метод определения теплоты адсорбции. Методы расчёта теплоты физической адсорбции. Эмпирические уравнения для оценки теплоты химической адсорбции.
19. Энтропия адсорбции. Методы расчета энтропии адсорбции. Проблема инертности адсорбентов.
20. Время «жизни» частиц в адсорбированном состоянии.

Результаты коллоквиумов определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется в случае полного безошибочного ответа, полностью раскрывающего суть вопросов, с правильным применением понятий и определений.

Оценка «хорошо» выставляется в случае достаточно полного ответа, содержащего несущественные ошибки, и при недостаточно чётком ответе на уточняющие и дополнительные вопросы.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, не показавшему знания в полном объеме, допустившему ошибки и неточности при ответе на вопросы экзаменационного билета. При этом хотя бы по двум вопросам билета ошибки не должны иметь принципиального характера.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту в случае неполного и поверхностного ответа на три из четырех вопросов билета, при допущении принципиальных ошибок в ответах на дополнительные и уточняющие вопросы.

#### Индивидуальные задания (ИОПК 1.2, ИОПК 1.3, ИПК 1.1, ИПК 1.2)

Примеры темы индивидуальных заданий:

1. Цеолиты: особые свойства пористой структуры, эффект «молекулярного сита», использование в сорбции.
2. Упорядоченные мезопористые оксиды кремния: MCM-41, MCM-48, MCM-50, SBA-15 и другие, особенности получения, структура, использование в сорбции.
3. Получение кислорода из воздуха адсорбционным способом: установка короткоциклового адсорбции, особенности используемых сорбентов.
4. Использование адсорбции в решении задач направленного транспорта лекарственных средств (drug delivery).
5. Адсорбционная очистка крови: гемосорбенты, особенности структуры, особенности адсорбции компонентов из крови
6. Фильтрация в производстве пива, алкогольных напитков и других продуктов питания: особенности процессов, используемые сорбенты.
7. Биоминерализация как процесс формирования пористых материалов: особенности процесса и структуры получаемых материалов.
8. Иерархические пористые материалы: особенности структуры, подходы к синтезу, области применения.
9. Металлорганические каркасы (MOF): особенности структуры, использование в адсорбции.
10. Адсорбенты для улавливания нефтепродуктов, сбора разливов нефти.
11. Углеродные сорбенты, получаемые при переработке биомассы: особенности пористой структуры, области применения.
12. Получение пористых материалов при переработке рисовой шелухи и других продуктов сельского хозяйства.
13. Пористые полимеры: особенности синтеза и структуры, применение в теплоизоляции и других областях.
14. Адсорбционная очистка природного газа перед транспортировкой: осушка, бензинивание, улавливание соединений серы и др., используемые сорбенты.
15. Адсорбция CO<sub>2</sub>: используемые сорбенты, примеры использования в космических кораблях и т.д.
16. Сорбционные материалы для средств индивидуальной и коллективной защиты органов дыхания, устройство противогаза, используемые сорбенты.
17. Исторические аспекты ключевых работ в области сорбции. Роль этих работ для современной науки.
18. Темплатный метод получения пористых материалов: суть подходов soft-templating и hard-templating, примеры получаемых материалов.
19. Темплатный синтез на крыле бабочки: особенности структуры крыла бабочки и примеры функциональных материалов на его основе.
20. Конкурентная адсорбция: суть явления, примеры использования, регенерация сорбентов паром и др.

21. Абсорбция: суть явления, примеры использования в промышленности на примере получения серной кислоты или других промышленных процессов.

22. Адсорбционные холодильники: как с помощью адсорбции запастись тепло, суть процессов, используемые сорбенты.

23. Адсорбционные технологии в защите окружающей среды: улавливание газообразных загрязнителей, очистка сточных вод и т.д.

24. Гибридные материалы на примере органофункционализированного оксида кремния: особенности получения, структуры, адсорбционных свойств на примере использования в хроматографии.

25. Сорбенты для сбора жидких радиоактивных отходов.

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

Экзамен в седьмом семестре проводится в устной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из четырех вопросов, проверяющих ИОПК 1.1., ИОПК 2.3., ИПК 1.1, ИПК 1.2., ИПК 1.4. Продолжительность экзамена 1,5 часа, из них 1 ч выделяется на подготовку ответов и 30 минут на ответ.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Классификация явлений сорбция и адсорбция.
2. Объёмный и весовой методы изучения адсорбции на границе раздела газ – твёрдое тело. Расчет величины адсорбции газа на твёрдой поверхности.
3. Основные зависимости при изучении адсорбции
4. Практическое применение сорбционных явлений.
5. Физическая и химическая адсорбция. Критерии различия.
6. Методы расчёта теплоты физической адсорбции.
7. Методы расчёта теплоты химической адсорбции.
8. Природа сил и расчёт энергии физической адсорбции
9. Потенциальные кривые адсорбции.
10. Изобары адсорбции.
11. Классификация изотерм адсорбции
12. Изотерма Генри. Вывод уравнения Генри. Особенности изотермы Генри.
13. Теория Лэнгмюра. Основные положения. Кинетический вывод уравнения
14. Изотермы многоцентровой адсорбции на однородных поверхностях (В.Е. Островский).
15. Уравнение изотермы Фрейндлиха. Вывод. Анализ
16. Уравнение изотермы Тёмкина – Шлыгина – Фрумкина. Анализ
17. Кинетика адсорбционных процессов
18. Теория БЭТ. Основные допущения. Вывод уравнения БЭТ.
19. Изотерма Арановича. Сравнение с уравнением БЭТ.
20. Теория полимолекулярной адсорбции на неоднородных поверхностях. Общие положения. Анализ уравнения.
21. Классификация адсорбентов по структурным типам.
22. Разновидность пор адсорбентов и их структурные типы
23. Модельные виды пор и закономерности конденсации в них (отсутствие петли гистерезиса).
24. Особенности капиллярной конденсации на адсорбентах с коническими и цилиндрическими порами.
25. Определение размера пор.
26. Особенности адсорбции в микропорах. Уравнение Дубинина-Радушкевича
27. Определение величины удельной поверхности на основании адсорбционных данных (метод Лэнгмюра)

28. Определение величины удельной поверхности и пористости с использованием изотермы в относительных координатах.
29. Определение величины удельной поверхности на основании адсорбционных данных (метод БЭТ).
30. Определение величины удельной поверхности на основании адсорбционных данных (метод Гаркинса и Юра)
31. Неадсорбционные методы определения удельной поверхности твёрдых тел.
32. Раздельное определение активной поверхности методами хемосорбции.
33. Фотоадсорбция. Влияние различных факторов на фотоадсорбцию
34. Основные закономерности фотосорбции.
35. Эффекты «последствия» и «памяти» при фотосорбции
36. Механизм фотосорбционного эффекта. Электронный и экситонный механизмы фотосорбции.
37. Фотокаталитический эффект.
38. Проблемы фотокаталитического разложения воды. Другие фотореакции.
39. Методы изучения фотосорбционных и фотокаталитических процессов.
40. Особенности адсорбционных процессов в нанодисперсных системах.
41. Физическая адсорбция в промышленности. Основные стадии адсорбции в промышленном процессе
42. Промышленные адсорбенты. Требования к промышленным адсорбентам.
43. Угли, силикагели, алюмогели, цеолиты, другие сорбенты.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» выставляется в случае полного безошибочного ответа, полностью раскрывающего суть вопросов, с правильным применением понятий и определений.

Оценка «хорошо» выставляется в случае достаточно полного ответа, содержащего несущественные ошибки, и при недостаточно чётком ответе на уточняющие и дополнительные вопросы.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, не показавшему знания в полном объеме, допустившему ошибки и неточности при ответе на вопросы экзаменационного билета. При этом хотя бы по двум вопросам билета ошибки не должны иметь принципиального характера.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту в случае неполного и поверхностного ответа на три из четырех вопросов билета, при допущении принципиальных ошибок в ответах на дополнительные и уточняющие вопросы.

### **Информация о разработчиках**

Мамонтов Григорий Владимирович, канд. хим. наук, кафедра физической и коллоидной химии химического факультета Томского государственного университета, доцент.