

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Хеин Мьят Лвин

**Коллоидно-химические основы получения каталитически
активных мембран на основе оксидов ванадия**

1.4.10 – Коллоидная химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре коллоидной химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель:

кандидат химических наук, доцент

Яровая Оксана Викторовна

доцент кафедры коллоидной химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор

Лебедева Ольга Евгеньевна

заведующий кафедрой общей химии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

кандидат химических наук

Теплоногова Мария Александровна

младший научный сотрудник лаборатории нанобиоматериалов и биоэффекторов для тераностики социально-значимых заболеваний федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук»

Ведущая организация

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», химический факультет

Защита диссертации состоится « 20 » октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ.1.4.02 при Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на сайте https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/ федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «28» августа 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
РХТУ.1.4.02, д.х.н., доцент

Мурашова Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наблюдается возрастающий интерес к разработке гибридных технологий, объединяющие разделительные и каталитические процессы. Одной из таких технологий является совмещение микрофльтрации для очистки от грубодисперсных примесей с каталитической очисткой от остаточного содержания растворенных органических соединений.

Реализация подобных технологий сдерживается отсутствием простых и масштабируемых технологий нанесенных слоев из каталитически активных компонентов. Перспективным методом для получения подобных слоев является золь-гель метод. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные о влиянии коллоидно-химических свойства золь ванадийсодержащих соединений на процессы нанесения и о влиянии условий нанесения на характеристики полученных слоев. Разработка коллоидно-химических основ получения нанесенных ванадийсодержащих слоев на поверхности керамических трубчатых мембран золь-гель методом представляет собой важную научную и практическую задачу.

Степень разработанности темы. В данной работе предложено применять агрегативно устойчивые золи $V_2O_5 \cdot nH_2O$ для формирования каталитически активных слоев на поверхности керамических мембран, для их применения в жидкофазных реакциях окисления. В современных научных исследованиях представлены различные методы синтеза наноразмерных частиц V_2O_5 . Для практического применения особенно интересен метод гидролиза V_2O_5 с использованием H_2O_2 , который выделяется своей экологической безопасностью, низкими затратами и простотой выполнения. Тем не менее, в научной литературе отмечается отсутствие систематизированных данных о коллоидно-химических свойствах подобных систем. Данные о получении каталитически активных мембран с нанесенными слоями V_2O_5 золь-гель методом отсутствуют.

Цель работы. Целью данной работы являлась разработка коллоидно-химических основ получения на поверхности керамических трубчатых мембран функциональных слоев на основе V_2O_5 золь-гель методом.

Задачи работы. Для достижения данной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать основные стадии синтеза золя V_2O_5 и получить комплекс данных об основных коллоидно-химических свойствах;
2. Выбрать способы и условия нанесения, позволяющие получить нанесенный слой с высокой адгезией к подложке;
3. Отработать основные стадии процесса получения мембран, включая сушку и термообработку, установить влияние условий на основные характеристики нанесенных слоев;
4. Оценить каталитическую активность полученных керамических мембран V_2O_5/Al_2O_3 в реакции каталитического разложения красителей метиленового синего и Родамина Б в разбавленных водных растворах.

Научная новизна результатов исследования

1. Впервые изучено влияние условий синтеза на коллоидно-химические свойства золей $V_2O_5 \cdot nH_2O$, полученных термолизом грубодисперсного V_2O_5 в присутствии пероксида водорода, что позволило выявить концентрационную область V_2O_5 (0,3-1,6% мас.), в которой возможно образование агрегативно устойчивых золей.
2. Впервые получен комплекс данных о коллоидно-химических свойствах золей, синтезированных с разной исходной концентрацией V_2O_5 (концентрация соединений ванадия в нерастворенной и растворенной формах, размер, форма и химический состав частиц, вязкость золей, знак и величина электрокинетического потенциала, влияние pH дисперсионной среды и содержания индифферентного электролита на агрегативную устойчивость), что позволило выбрать условия формирования нанесенных слоев.
3. Впервые получен комплекс данных о фазовом составе, удельной поверхности, пористых характеристиках ксерогелей и нанесенных слоев $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$, а также продуктах их термического разложения, что позволило выбрать режим термообработки нанесенных слоев.
4. Впервые получены данные о каталитической активности мембран V_2O_5/Al_2O_3 в реакции разложения метиленового синего и родамина Б, в присутствии пероксида водорода в условиях видимого света (без дополнительного УФ излучения).

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработаны коллоидно-химические основы получения каталитических мембран с нанесенным слоем V_2O_5 с использованием золей, полученных гидролизом грубодисперсного V_2O_5 в присутствии пероксида водорода при температуре кипения.

Показана взаимосвязь между условиями синтеза золя, его коллоидно-химическими свойствами и их влиянием на условия проведения стадии нанесения.

2. Реализован способ нанесения слоев аналогом метода нафилтрования – методом, который не требует сложного аппаратного оформления и который может быть масштабирован. Метод позволяет наносить слои V_2O_5/Al_2O_3 за одну стадию и закреплять слои на поверхности за один цикл сушки и термообработки.

3. Разработаны основные этапы нанесения слоев V_2O_5/Al_2O_3 с применением синтезированных золь с удельной массой нанесенного слоя до 9 мг/см^2 . Определены оптимальные условия термообработки (650°C), при которых достигается хорошая адгезия к поверхности мембран на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Определен диапазон величин pH растворов, в которых нанесенные слои, полученные при разной температуре термообработки, сохраняют химическую стабильность.

4. Установлена каталитическая активность мембран V_2O_5/Al_2O_3 в процессе разложения органических красителей метиленового синего и Родамина Б в разбавленных водных растворах в присутствии пероксида водорода в условиях видимого света (без дополнительного УФ излучения), которая на порядок превышает каталитическую активность порошковых катализаторов на основе V_2O_5 .

Методология и методы исследования. Методология разработки способов синтеза гидрозолей опиралась на традиционные представления коллоидной химии о закономерностях формирования частиц методом химической конденсации и физико-химические закономерности гидролиза оксида ванадия (V) в присутствии пероксида водорода. Исследования основных коллоидно-химических свойств гидрозолей проводили с использованием как традиционного, так и современного оборудования, были использованы методы спектроскопии в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях, рентгенофазового анализа, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, термогравиметрический анализ с дифференциальной сканирующей калориметрией, метод низкотемпературной адсорбции азота, традиционные методы получения кинетических данных о проведении реакции жидкофазного окисления красителей в разбавленных водных растворах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основные стадии синтеза золей $V_2O_5 \cdot nH_2O$ термолизом грубодисперсного V_2O_5 в присутствии пероксида водорода и условия их проведения, при которых возможно образование агрегативно устойчивых золей.
2. Комплекс данных о коллоидно-химических свойствах золей, синтезированных с разной исходной концентрацией V_2O_5 , подтверждающий возможность управлять коллоидно-химическими свойствами золей на стадии синтеза. Данные о диапазоне величин pH дисперсионной среды и содержании индифферентного электролита, при которых золи сохраняют свою агрегативную устойчивость.
3. Комплекс данных о фазовом составе, удельной поверхности, пористых характеристиках ксерогелей $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$ и продуктах их термического разложения.
4. Способ нанесения слоев аналогом метода нафильтровывания. Метод позволяет наносить слои V_2O_5/Al_2O_3 за одну стадию и закреплять слои на поверхности за один цикл сушки и термообработки.
5. Условия получения каталитических мембран V_2O_5/Al_2O_3 с удельной массой нанесенного слоя до 9 мг/см^2 , при которых слой обладает удовлетворительной адгезией к подложке.
6. Каталитическая активности мембран V_2O_5/Al_2O_3 в процессе разложения органических красителей метиленового синего и Родамина Б в разбавленных водных растворах в присутствии пероксида водорода в условиях видимого света (без дополнительного УФ излучения).

Степень достоверности результатов. Уровень надежности полученных результатов определяется использованием современных измерительных инструментов и стандартизированных методик исследования, воспроизводимостью полученных данных. Кроме того, согласованность результатов с основополагающими принципами коллоидной химии и существующими литературными источниками служит дополнительным подтверждением их достоверности.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключался в анализе литературных данных, участии в постановке и проведении экспериментов, обработке, обсуждении и обобщении экспериментальных данных, участии в подготовке статей, представлении результатов работы на всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: III Конференции молодых ученых с международным участием «Новые материалы и химические технологии» (Москва, 2022 г.), VII Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (Иваново – Суздаль, 2023 г.), Международная научно-практическая конференция Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. (Севастополь, 2023 г.), X молодежная школа-конференции «Современные аспекты химии». (Пермь, 2023 г.), Международная научно-практическая конференция «Научное измерение - 2023». (Петрозаводск. 2023 г.), VI Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике (IC CCRSM), посвященная 125-летию со дня рождения П.А. Ребиндера. (Казань, 2023 г.), X Всероссийская конференция (с международным участием) «Высокотемпературная химия оксидных систем и материалов». (Санкт-Петербург, 2023), XXVIII Всероссийской Конференции Молодых Учёных — Химиков (Нижний Новгород, 2025).

Публикации. В ходе диссертационного исследования было опубликовано 14 научных трудов, включая 3 статьи индексированные в международных базах, данных Scopus и Web of Science, а также 2 статьи в журнале, включённом в перечень ВАК. Результаты данного исследования подтверждены участием в научных конференциях всероссийского и международного уровня.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, трех основных глав, заключительных выводов и библиографического списка из 201 источника. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, включая 73 рисунка и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, определены его задачи, указана научная новизна и практическая ценность проведенного исследования.

В первой главе представлено аналитическое обобщение существующих литературных данных, в котором рассматриваются каталитические и химические свойства ванадия, его оксидов и гидроксидов. Особое внимание уделено методам синтеза наночастиц V_2O_5 и их характеристикам. Подробно обсуждаются известные способы получения нанесенных слоев на основе V_2O_5 на различных носителях, таких как порошки, гранулы и керамические мембраны.

Во второй главе представлены характеристики исходных материалов и

методология синтеза золя $V_2O_5 \cdot nH_2O$. а также подходы к получению нанесенных слоев на поверхности керамических мембран и методики для определения коллоидно-химических и физико-химических свойств исследуемых систем, включая каталитические испытания. Все реактивы, использованные в исследовании, имели степень чистоты «х.ч.», поэтому дополнительной очистке не подвергались.

В третьей главе представлены результаты исследований, посвященных разработке коллоидно-химических основ получения каталитических мембран V_2O_5/Al_2O_3 золь-гель методом.

В качестве метода синтеза был выбран термолиз (гидролиз при повышенных температурах) порошка V_2O_5 в растворе пероксида водорода. В литературе описан механизм формирования наночастиц в ходе гидролиза при комнатной температуре (рисунок 1) и указано, что процесс занимает длительное время – более 4 часов.

На первой стадии синтеза порошок V_2O_5 растворяют в растворе пероксида водорода. Было установлено, что осуществить полный перевод V_2O_5 в водорастворимую форму при комнатной температуре возможно при мольном соотношении реагентов $[V_2O_5]:[H_2O_2]$ равном или большем 1:30 моль/моль. На второй стадии синтеза для ускорения процессов конденсации и формирования частиц термообработку раствора проводили при температуре кипения.

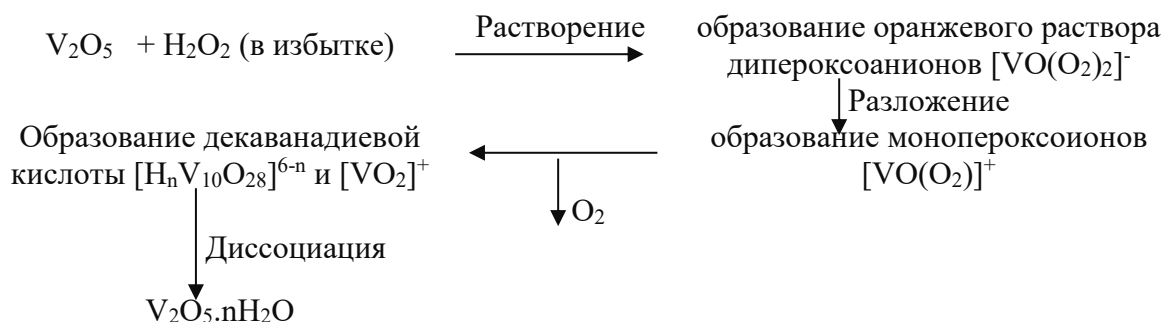


Рисунок 1 – Механизм формирования наночастиц при гидролизе порошка V_2O_5 в растворе пероксида водорода при комнатной температуре ^[1]

В диапазоне мольных соотношений $[V_2O_5]:[H_2O_2]$ от 1:30 до 1:90 моль/моль повышение мольного соотношения реагентов не приводит к существенному изменению концентрации растворенных форм ванадия в дисперсионной среде. Величина pH дисперсионной среды также оставалась постоянной и составляла $2,45 \pm 0,05$. Проведение процесса при температуре кипения позволяет сократить время

¹ Bruno Alonso. *Synthesis of Vanadium Oxide Gels from Peroxovanadic Acid Solutions: A 51V NMR Study* / Jacques Livage // *Journal of Solid-State Chemistry* —1999. —Vol. 148 — P.16 – 19.

синтеза до 15 минут. По данным просвечивающей электронной микроскопии частицы имеют стржевидную (цилиндрическую) форму с диаметром 15 - 25 нм и длиной 0,3 - 0,8 мкм. На основании данных рентгенофазового анализа ксерогеля (рисунок 6) и электронограммы (врезка на рисунке 2) было установлено, что частицы ксерогеля представляют собой $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$.

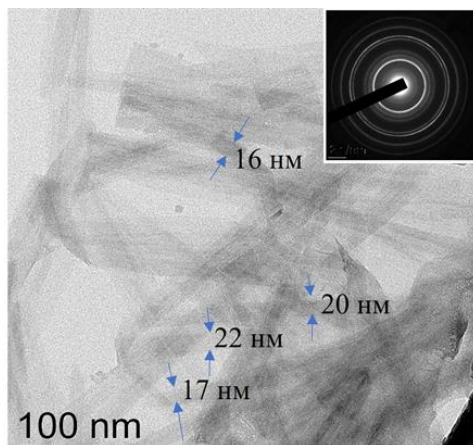


Рисунок 2 - Микрофотография и электронограмма частиц $V_2O_5 \cdot nH_2O$

Было установлено, что в зависимости от выбранной концентрации исходного порошка, синтезированные золи обладают различными свойствами. Формирование агрегативно устойчивого золя происходит в системах с концентрацией от 0,3 до 1,6% мас. При суммарной концентрации оксида ванадия в дисперсных системах ниже 0,3 мас.% система представляет собой раствор соединений ванадия, в котором есть крупные седиментационно неустойчивые

частицы. При концентрациях выше 1,6 мас.% результатом синтеза является смесь золя и геля. В таблице 1 приведены данные о концентрации нерастворимых и растворенных форм ванадия в золях, и доля нерастворимых соединений ванадия от его общего содержания в золе.

Для оценки вклада электростатической составляющей в агрегативную устойчивость синтезированных зольных разных концентраций была определена электрофоретическая подвижность частиц дисперсной фазы. При pH дисперсионной среды зольных $2,45 \pm 0,05$ частицы дисперсной фазы заряжены отрицательно, что хорошо согласуется с положением изоэлектрической точки для V_2O_5 (1,0-2,0 единицы pH).

Предположения о строении двойного электрического слоя выдвигали на основе литературных данных о строении поверхностного слоя оксида ванадия (V) и составе гидролизированных форм ванадия при значениях pH 2-3^[2]. Отрицательный заряд поверхности может быть сформирован по механизму частичной диссоциации поверхностных групп V-OH, часть из которых отдает протон, а также по механизму специфической адсорбции ионов неиндифферентного электролита, к которым

² Ian Thompson *Electrochemical Studies of Catalysed Aqueous Sulphide Oxidation. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Imperial College of Science and Technology University of London. London. – 1987. –171 p.*

относятся декаванат-ионы $[H_nV_{10}O_{28}]^{(6-n)-}$, в частности, $[H_2V_{10}O_{28}]^{4-}$ ($n=2$). Противоионами в этом случае выступают протоны. Предполагаемое строение двойного электрического слоя можно представить следующим образом:

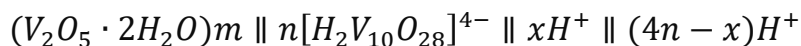


Таблица 1 - Содержание частиц дисперсной фазы и растворенных форм ванадия в дисперсионной среде золь различных концентраций (мольное соотношение реагентов $[V_2O_5]:[H_2O_2] = 1:30$ моль/моль, $pH = 2,45 \pm 0,05$).

w, % мас.	Концентрация частиц дисперсной фазы в пересчете на $[V_2O_5]$, $C_{\text{част}}$		Концентрация растворенных форм в пересчете на $[V_2O_5]$, $C_{\text{уф}}$		Массовая доля частиц от общего содержания $[V_2O_5]$ в золе, $X_{\text{част}}$	Ионная сила дисперсионной среды, I , моль/м ³
	ммоль/л	г/л	ммоль/л	г/л		
0,3	0,4	0,73	12,5	2,28	0,242	26,8
0,4	1,1	1,91	11,5	2,09	0,477	24,8
0,5	1,8	3,27	9,5	1,73	0,654	20,8
0,6	2,3	4,14	10,2	1,86	0,691	22,2
0,8	3,8	6,96	5,7	1,04	0,870	13,2
1	4,9	8,89	6,1	1,11	0,889	14,0
1,2	6,0	10,96	5,7	1,04	0,914	13,2
1,4	7,1	12,91	6,0	1,09	0,922	13,8
1,6	8,2	14,93	5,9	1,07	0,933	13,6

Расчет значений электрокинетического потенциала проводили как по уравнению Гельмгольца-Смолуховского, так и по уравнению Генри, для учета цилиндрической формы частиц. Анализ данных (таблица 2) позволяет предположить, что высокая агрегативная устойчивость синтезированных золь преимущественно обеспечивается электростатическим фактором.

Таблица 2 – Расчет функции Генри $f(\chi_a)$ для стержней с радиусом основания 10 нм.

w, % мас.	Ионная сила среды, моль/м ³	λ , нм	χ_a	$f(\chi_a)$	Электрофо- ретическая подвижность, $\times 10^8$ м ² /В·с	ζ -потенциал по ур. Смолуховского, мВ	ζ - потенциал по ур. Генри, мВ
0,5	20,8	2,2	4,67	0,72	1,38	- 21,0	- 44,3
0,8	13,2	2,7	3,72	0,68	1,82	- 27,7	- 61,1
1,0	14,0	2,6	3,83	0,68	1,86	- 28,3	- 62,1
1,3	13,5	2,7	3,76	0,68	1,88	- 28,6	- 63,0
1,5	13,6	2,7	3,78	0,68	1,95	- 29,7	- 65,3

С увеличением концентрации синтезированного золя увеличивается его вязкость (рисунок 2). Обработка начального участка в координатах уравнения Эйнштейна позволила оценить коэффициент формы частиц, который составил 9,6. Это хорошо

согласуется с анизотропной цилиндрической формой частиц, определенной методом сканирующей электронной микроскопии.

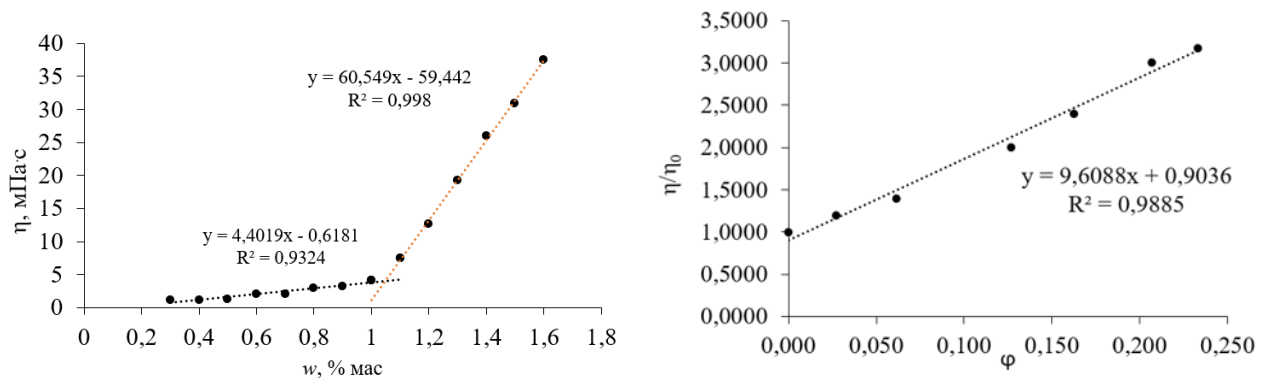


Рисунок 2 – Вязкость η золей различных концентраций (слева) и зависимость относительной вязкости золя η/η_0 от объемной доли частиц дисперсной фазы ϕ (справа)

Область агрегативной устойчивости золей при различных величинах pH дисперсионной среды и порог быстрой коагуляции определяли турбидиметрическим методом. Максимальные значения оптической плотности и порога быстрой коагуляции сохраняются в узком интервале величин pH: от 2,4 до 2,8 (рисунок 3). При pH менее 2,4 происходит осаждение частиц, что соответствует резкому падению оптической плотности на графике и снижению значений порога быстрой коагуляции. При pH более 2,8 оптическая плотность плавно снижается из-за растворения частиц. Согласно диаграмме состояния ванадия (V) в водной среде, в дисперсионной среде увеличивается содержание ионов $[\text{H}_2\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{4-}$ и/или VO^{2+} , в зависимости от концентрации растворов. При повышении значения pH ионы также могут принимать формы VO_4^{3-} , H_2VO_4^- , HVO_4^{2-} . Увеличение ионной силы дисперсионной среды приводит к снижению величины порога быстрой коагуляции.

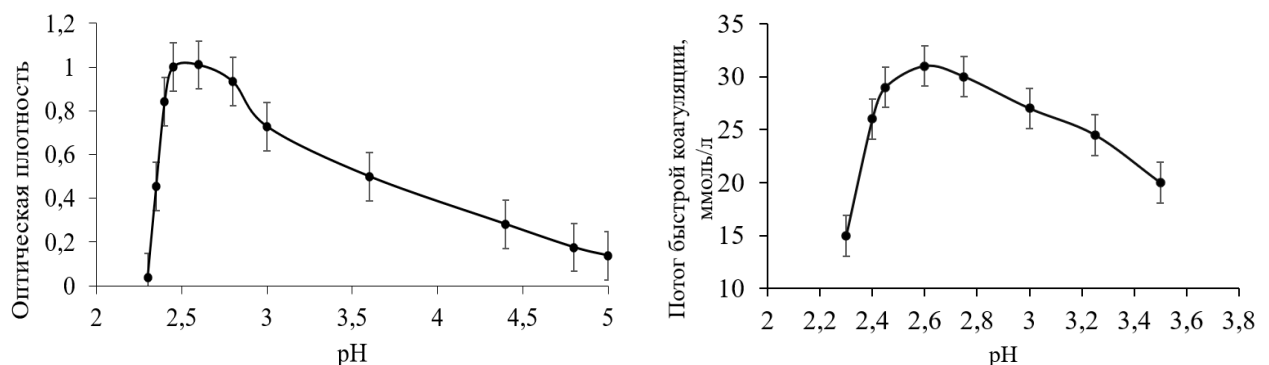


Рисунок 3 – Оптическая плотность золя (слева) и порог быстрой коагуляции в присутствии NaNO_3 (справа) при различных pH дисперсионной среды (начальный pH = 2,45)

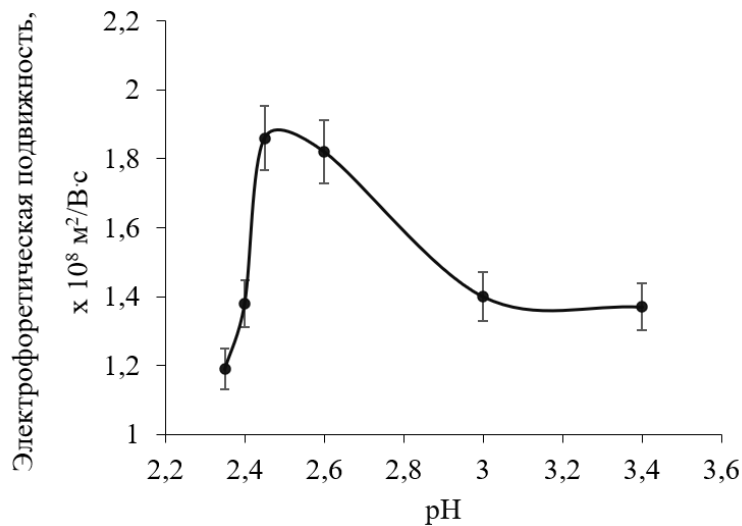


Рисунок 4 - Зависимость электрофоретической подвижности частиц дисперсной фазы от pH дисперсионной среды (концентрация золя - 1% мас., pH исходного золя - 2,45)

Для исследования агрегативной устойчивости неразбавленных золь была получена зависимость электрофоретической подвижности частиц дисперсной фазы от величины pH дисперсионной среды (рисунок 4). Было установлено, что в

исследованном диапазоне величин pH дисперсионной среды частицы заряжены отрицательно. Максимальное значение электрофоретической подвижности соответствует величине pH дисперсионной среды синтезированного золя и составляет 2,45 единиц.

Таким образом, полученные разными методами результаты хорошо согласуются между собой. Область агрегативной устойчивости синтезированных золь достаточно узкая и составляет от 2,4 до 2,8 единиц pH. Смещение в более кислую область приводит к коагуляции частиц. Смещение в нейтральную область возможно до величины pH 3,0-3,4, при этом концентрация частиц дисперсной фазы снижается за счет растворения и система становится более чувствительна к введению электролитов.

Для исследования влияния концентрации электролита на более концентрированные системы был предложен реологический метод (рисунок 5).

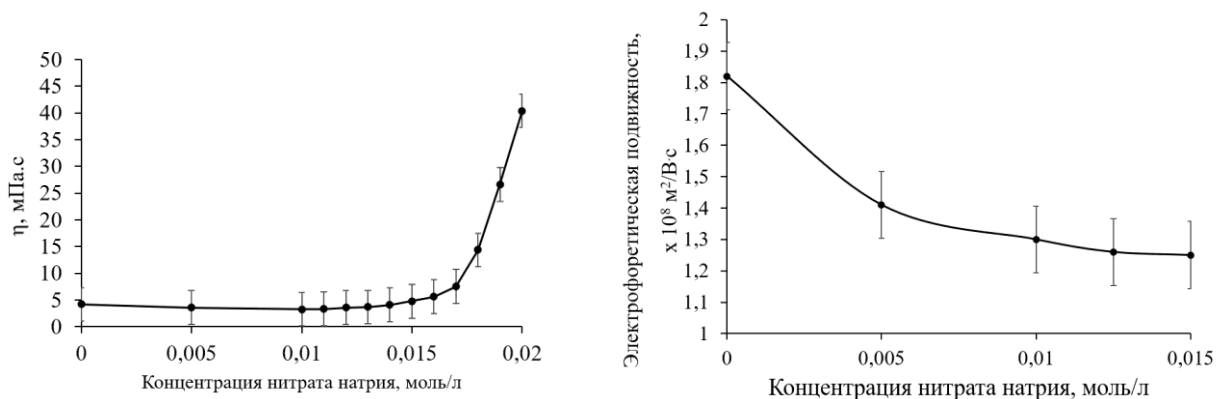


Рисунок 5 – Зависимость вязкости золя (слева) и электрофоретической подвижности частиц (справа) от концентрации электролита NaNO_3 (pH = 2,45)

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что нитрат натрия является индифферентным электролитом. Отклонения, которые наблюдаются при исследовании разбавленных золей могут быть связаны с низкой частичной концентрацией и иной кинетикой и механизмом агрегации. Для практического использования золей, синтезированных с концентрациями от 0,3% мас. и выше, рекомендуется контролировать содержание индифферентных электролитов и не вводить их в содержание более чем 13 ммоль/л, а ионную силу среды рекомендуется поддерживать не более чем 25 ммоль/л.

Для выбора режимов сушки и термообработки мембран с нанесенными слоями был исследован ксерогель, полученный сушкой золя $V_2O_5 \cdot nH_2O$ при комнатной температуре. Рентгенофазовый анализ показал, что частицы ксерогеля представлены $V_2O_5 \cdot 1.6H_2O$ (см. рисунок 6, слева). Для выбора ключевых температур был проведен термогравиметрический анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия (ТГ/ДСК) ксерогеля (рисунок 6, справа).

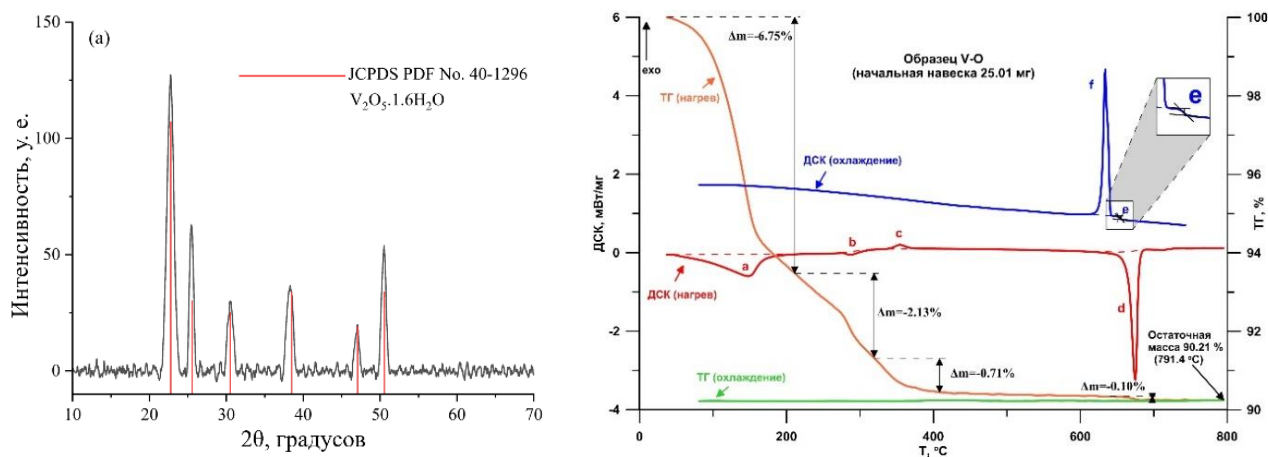


Рисунок 6 – Дифрактограмма (слева) и ТГ/ДСК кривые (справа) ксерогеля, полученного сушкой золя при 25 °С

Было установлено, что для удаления физически связанной воды следует сушить образец при температуре 145-150 °С, а для удаления связанной воды – при температуре 285-290 °С. При этом потери массы незначительны, ксерогель обладает малой гигроскопичностью. С учетом малой массы нанесенного слоя и того, что при термообработке нанесенных слоев подъем температуры осуществляют со скоростью не более 2 град/мин, можно не осуществлять дополнительную выдержку при этих температурах. Это позволит сократить время термообработки и амортизацию оборудования на производстве.

Основным вопросом является выбор конечной температуры термообработки. Установлено, что температура кристаллизации V_2O_5 составляет $354,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура плавления образца равна $674,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура затвердевания при охлаждении — $633,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение температуры термообработки обычно негативно сказывается на удельной поверхности и пористых характеристиках слоев. С другой стороны, термообработка должна обеспечить хорошую механическую прочность слоя и высокую адгезию к подложке. Увеличение температуры термообработки и ее приближение к температуре плавления должно положительно сказаться на этих характеристиках нанесенных слоев.

Для дальнейших исследований было выбрано 4 температуры: 400, 600, 650 и 700 $^{\circ}\text{C}$. Режим термообработки был аналогичен режиму термообработки мембран с нанесенными слоями. Анализ дифрактограмм полученных порошков показал, что дифракционные максимумы для всех образцов хорошо соответствовали стандартной рентгенограмме V_2O_5 (PDF № 41-1426).

В качестве дополнительной информации были получены инфракрасные спектры поглощения ксерогеля и порошков (рисунок 7). Было обнаружено что, после термообработки 400 $^{\circ}\text{C}$ в ИК-спектре наблюдается исчезновение интенсивности полос, связанных с наличием воды, изменения интенсивности и положения полос, связанных с колебаниями V-O, отражающими структурные изменения в материале по мере удаления воды. При дальнейшем повышении температуры термообработки интенсивность полос, связанных с колебаниями V-O, уменьшается из-за уменьшения площади поверхности, так как может уменьшиться количество связей V-O на поверхности, ответственных за наблюдаемые колебания в спектре.

Для определения удельной поверхности и пористых характеристик ксерогеля и порошков, полученных при различной температуре термообработки, использовали метод низкотемпературной десорбции азота. Анализ данных показал, что изотермы для ксерогеля и порошков, полученных при 400 $^{\circ}\text{C}$, наблюдается петля гистерезиса, что указывает на наличие мезопор (рисунок 8). Вид петли гистерезиса относится к типу H3 по классификации Де Бура и указывает на присутствие пор щелевидной формы. Следует отметить, что для остальных изотерм либо петля гистерезиса отсутствует, либо расхождения между кривыми адсорбции и десорбции незначительны.

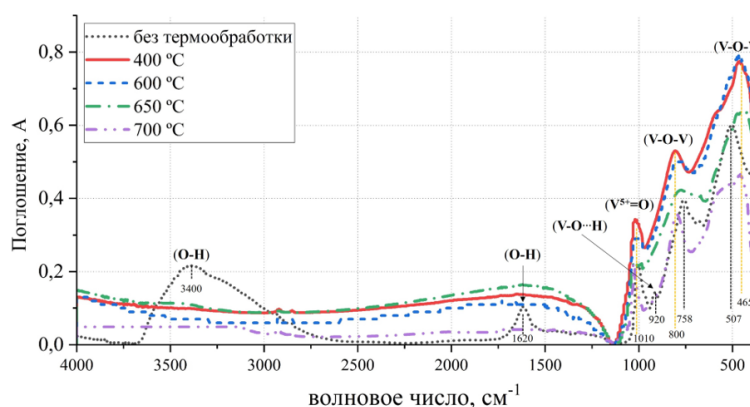


Рисунок 7 – Инфракрасные спектры поглощения ксерогеля $V_2O_5 \cdot 1.6H_2O$ при различных температурах термообработки

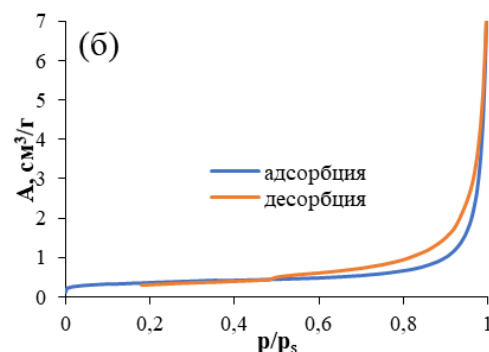


Рисунок 8 – Изотермы адсорбции и десорбции азота на порошке (термообработка при 400 °C)

В таблице 3 приведены сводные данные о значениях удельной поверхности и объема мезопор для ксерогеля и порошков. С учетом низкой удельной поверхности и малого адсорбционного объема мезопор, можно отнести исследуемые объекты к макропористым адсорбентам.

Таблица 3 – Удельная поверхность и пористые характеристики ксерогеля и порошков, полученных при разной температуре термообработки

Температура термообработки (°C)	БЭТ Удельная поверхность, м ² /г	ВН преобладающий диаметр пор, нм	ВН объем мезопор, см ³ /г
Ксерогель сушка при 25 °C	0,68	2; 100	0,0043
400	1,27	2; 100	0,0110
600	0,57	100	0,0046
650	0,54	100	0,0040
700	0,42	100	0,0040

Результаты, полученные на основе адсорбционных данных, показывают, что после термообработки при температуре 400°C удельная поверхность порошка увеличивается практически в 2 раза. Это увеличение может быть обусловлено удалением молекул воды, интеркалированных между слоями V_2O_5 , что приводит к расширению расстояния между слоями V_2O_5 и повышению удельной поверхности и объём мезопор. На основании полученных результатов можно сделать предположение, что образец после термообработки при 400°C более подходит для дальнейшего каталитического применения. При этом для получения слоя большей механической прочности с лучшей адгезией к подложке целесообразно проводить термообработку при 600-700 °C, приближаясь к температуре плавления V_2O_5 .

Особенностью получения нанесенных слоев на поверхности мембран золь-гель методом заключается в том, что на поверхности мембраны формируют так называемый «влажный слой» из золя, который при удалении растворителя гелирует и удерживается на поверхности. При дальнейшей сушке и термообработке слой частиц дисперсной фазы упрочняется и закрепляется на подложке. На первой стадии ключевой задачей является формирование влажного слоя золя на поверхности. Основными требованиями к слою является его равномерность и достаточная концентрация частиц дисперсной фазы для создания конечного «сухого» слоя нужной толщины.

На основании предварительных экспериментов для получения нанесенного слоя в одну стадию был предложен аналог метода нанфильтрования слоя. Принцип метода заключается в пропускании через мембрану дисперсной системы под действием разницы давлений и формировании намывного слоя из частиц дисперсной фазы на поверхности мембраны. При использовании золя с стержневидными частицами частицы ориентируются параллельно подложке и не проходят через мембрану.

Золи с концентрациями выше 0,5% мас. фильтровались очень медленно, за счет высокой вязкости системы (см. рисунок 2). Для формирования слоев рекомендуется использовать золи с концентрацией от 0,3 до 0,5% мас. Их основные характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные коллоидно-химические свойства золь $V_2O_5 \cdot nH_2O$, использованных для нанесения

Свойство	Используемые золи		
Концентрация золя, % мас.	0,3	0,4	0,5
Концентрация частиц дисперсной фазы в пересчете на $[V_2O_5]$, г/л	0,73	1,91	3,27
Электрофоретическая подвижность частиц дисперсной фазы, $\times 10^8$ м ² /В·с	1,38	1,82	1,86
Величина pH дисперсионной среды	2,45	2,45	2,45
Содержание водорастворимых форм ванадия в дисперсионной среде в пересчете на $[V_2O_5]$, ммоль/л	12,5	11,5	9,5
Ионная сила дисперсионной среды, моль/м ³	26,8	24,8	20,8
Вязкость золя, мПа·с	1,09	1,17	1,25

Основным параметром, влияющим на толщину нанесенного слоя, является объем золя, который необходимо пропустить через мембрану. При выборе условий проведения эксперимента был сделан оценочный расчет объемов золя, которые

необходимо использовать для получения слоев заданной (теоретической) толщины. Экспериментально было показано, что сохранение бездефектных слоев на поверхности мембран после сушки на воздухе при 25 °С возможно при нанесении слоя с теоретической толщиной от 2 до 45 мкм. Нанесенный слой закрывает всю поверхность мембран и не имеет видимых трещин и дефектов (рисунок 9). Было показано, что нанесенные слои обладают равномерной толщиной, которая сопоставима с теоретически рассчитанной, отклонения составляют от 15 до 55% (таблица 5).

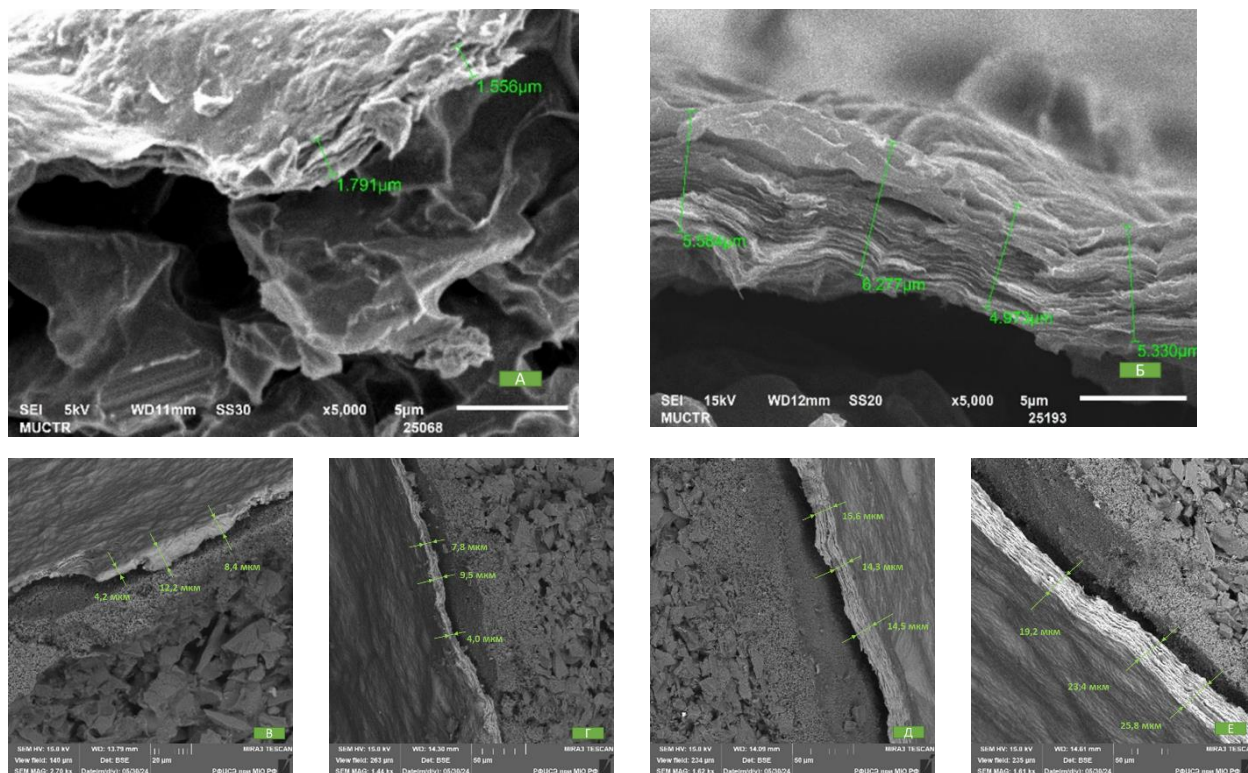


Рисунок 9 – Микрофотографии скола мембран, полученных после сушки на воздухе при 25 °С. Теоретическая толщина нанесенного слоя: а) 2 мкм; б, в) 10 мкм; г) 15 мкм; д) 25 мкм; е) 45 мкм

Таблица 5 – Сравнение расчетных величин толщины нанесенного слоя после сушки с экспериментально полученными результатами (по данным СЭМ).

Концентрация золя в пересчете на $[V_2O_5]$, % мас.	Толщина слоя $h_{\text{теор}}$, мкм (расчетная)	Толщина слоя $h_{\text{эксп}}$, мкм (по СЭМ)	Среднее значение толщины слоя $h_{\text{эксп}}$, мкм (по СЭМ)	Отклонение среднего значения, % от $h_{\text{теор}}$
0,3	2	1,6-1,8	1,7	15,0
0,5	10	4,2-8,6	6,4	36,0
0,5	15	4,0-9,5	6,8	54,6
0,5	25	14,3-15,6	15,0	40,0
0,5	45	19,2-25,8	22,3	50,4

По данным EDX-спектров с увеличением толщины слоя содержание ванадия слабо меняется, что хорошо согласуется с данными СЭМ о том, что слой полностью закрывает поверхность. EDX-спектры скола керамической мембраны показали наличие ванадия в нанесенном слое, и отсутствие ванадия в объеме пористой структуры подложки, что косвенно подтверждает отсутствие инфильтрации частиц в поры мембраны на стадии нанесения.

Был проведен термогравиметрический анализ образца мембраны с нанесенным слоем, высушенной на воздухе при 25 °С. Анализ тепловых эффектов приведен в таблице 6. Полученные данные показывают, что температуры основных процессов снижаются на несколько десятков градусов по сравнению с ксерогелями. Режим сушки и термообработки включал в себя следующие стадии: сушку влажных мембран на воздухе в течение 12 часов; подъем температуры со скоростью 2 град/мин; выдержку при температуре 400, 600, 650 или 700 °С в течение часа; медленное охлаждение мембран в течение 12 часов. Стадию сушки для удаления физически адсорбированной воды и выдержки для удаления связанной воды было принято исключить. За счет отсутствия в дисперсионной среде солей или регуляторов вязкости выдержка для разложения каких-либо соединений не требовалась.

Таблица 6 - Описание тепловых эффектов, зафиксированных на кривых ТГ/ДСК при анализе мембраны с нанесенным слоем $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$ после сушки на воздухе при температуре 25 °С (теоретическая толщина нанесенного слоя 15 мкм)

Процесс	Температуры начала, максимума и окончания тепловых эффектов для ксерогеля	Температуры начала, максимума и окончания тепловых эффектов для нанесенного слоя
Испарение физически связанной воды	$T_{нач} = 99,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 147,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 169,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	Не зафиксирован
Уход слабо связанной кристаллизационной воды	$T_{нач} = 278,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 286,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 309,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	Не зафиксирован
Уход прочно связанной воды и кристаллизация V_2O_5	$T_{нач} = 341,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 354,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 369,7\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{нач} = 322,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 333,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 366,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
Плавление V_2O_5	$T_{нач} = 665,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 674,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 679,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{нач} = 650,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 664,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 671,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
Затвердевание V_2O_5 при охлаждении	$T_{нач} = 640,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 633,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 629,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{нач} = 587,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{макс} = 572,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{кон} = 552,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что при выбранных температурах термообработки между оксидами алюминия и ванадия не наблюдается образование соединений, подтверждая тем самым их независимое существование. По данным СЭМ после термообработки при 400 °С на поверхности мембран фиксируются слои, морфология которых отлична от морфологии подложки, а толщина сопоставима с прогнозируемой теоретической толщиной. При увеличении температуры термообработки до 600 °С и выше, морфология поверхности мембраны меняется и нанесенный слой не фиксируется. По данным EDX-спектров в ходе термической обработки содержание ванадия на поверхности снижается. Для мембраны с теоретической толщиной слоя 2 мкм остаточное содержание ванадия на поверхности снижается в 9 раз, а для мембран со слоями 4,5 и 10 мкм – почти в 2 раза.

Для оценки содержания оксида ванадия на мембранах был проведен эксперимент по определению массы нанесенного оксида ванадия на мембранах после термообработки. Для этого нанесенный слой оксида ванадия растворяли при кипячении в 1 М растворе гидроксида натрия, содержание ванадия анализировали титриметическим методом, пересчитывая результаты на содержание V_2O_5 . Экспериментально определенная удельная масса нанесенного слоя с теоретической толщиной 10 мкм после сушки ($1,84 \text{ мг/см}^2$) близка к теоретически рассчитанной ($2,04 \text{ мг/см}^2$), расхождения составляют 10%. После термообработки при 600 и 650 °С потери массы V_2O_5 незначительны и составляет $1,6 \pm 0,6$ и $4,9 \pm 2,2$ % от массы V_2O_5 до термообработки соответственно. С увеличением температуры термообработки до 700 °С потеря массы V_2O_5 резко возрастает до $16,8 \pm 5,4$ %..

Полученные мембраны планировалось использовать в жидкофазных реакциях, поэтому представляло интерес оценить адгезию слоя к подложке при эксплуатации в водной среде. Мембраны после термообработки подвергали кипячению в дистиллированной воде в течение 30 минут, после чего определяли содержание ванадия (V) в растворе, пересчитывая результаты на содержание V_2O_5 .

Нанесенный слой, полученный после термообработки при температуре 400 °С, отслаивается в местах крупных дефектов подложки при формировании пузырьков воздуха в ходе кипячения. Это свидетельствует о недостаточной адгезии слоя к подложке и о недостаточной прочности слоя. Нанесенные слои, полученные после термообработки при температурах 600, 650 и 700 °С видимых дефектов после

кипячения не имели. Анализ остаточного содержания V_2O_5 на мембранах, полученных при термообработке при 600 °С, показал, что в ходе кипячения в раствор переходит $11,7 \pm 0,4$ % от содержания V_2O_5 . Перехода V_2O_5 в раствор для мембран, подвергнутых термообработке при 650 и 700 °С зафиксировано не было.

На второй стадии испытаний мембраны помещали в растворы с различной величиной pH от 1,0 до 14,0 единиц на трое суток. Затем нанесенные слои оксида ванадия растворяли при кипячении в 1 М растворе гидроксида натрия, содержание ванадия анализировали титриметическим методом. Нанесенные слои, полученные после термообработки при температуре 400 °С, в ходе проведенных испытаний отслаиваются от поверхности при всех значениях величин pH. Нанесенные слои, полученные после термообработки при температурах 600, 650 и 700 °С после испытаний видимых дефектов не имели. Анализ изменения массы нанесенных слоев (рисунок 11) показал, что слои, полученные при температуре 600 °С более чувствительны к выдержке при различных pH, тогда как потери массы для слоев, полученных после термообработки при 650 и 700 °С практически совпадают.

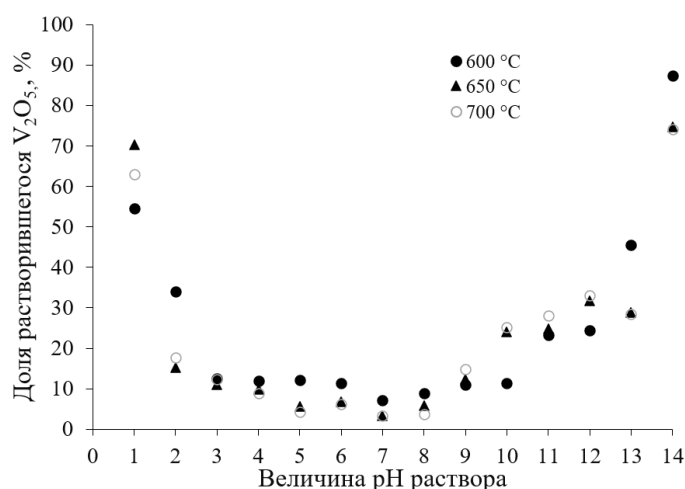


Рисунок 11 – Потеря массы слоя V_2O_5 при выдержке в растворах с различными значениями pH

На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы. При температуре термообработки 400 °С нанесенный слой начинает уплотняться, при этом снижается адгезия между подложкой и слоем. Данные слои могут представлять интерес для проведения газофазных реакций,

но для использования в жидких средах непригодны из-за недостаточной прочности контакта между слоем и подложкой. При повышении температуры термообработки до 600 °С самые мелкие частицы начинают плавиться, а при охлаждении - агрегировать. Температура термообработки 600 °С позволяет создать достаточно прочный слой, но потеря массы при вымывании больше, чем в случае термообработки при температуре 650 и 700 °С. При повышении температуры до 650 °С слой расплавляется, инфильтруется в поры подложки и создает тонкий слой с хорошей адгезией на зернах

оксида алюминия, из которого состоит подложка. При повышении температуры термообработки до 700 °С возможна возгонка V_2O_5 , причем для тонких слоев потери массы могут достигать 20%. Мембраны V_2O_5/Al_2O_3 для дальнейших каталитических испытаний получали при термообработке при 650 °С.

Для каталитических испытаний была выбрана реакция разложения красителей метиленового синего (МС) и Родамина Б (РБ) в разбавленных водных растворах в присутствии пероксида водорода при видимом свете. Эксперимент проводили при начальной концентрации метиленового синего 0,055 ммоль/л и Родамина Б 0,023 ммоль/л, при температуре 22 °С и атмосферном давлении в течение 3 часов, с измерением оптической плотности каждые 30 минут. Кажущиеся константы скорости реакции на порядок превышают значения, характерные для порошковых катализаторов на основе V_2O_5 .

Таблица 7 - Влияние массы нанесенного слоя на кажущуюся константу скорости реакции разложения метиленового синего и родамина Б

№	Общая масса слоя V_2O_5 , мг	Конверсия через 3 часа, %		Кажущаяся константа скорости			
				k , $\text{мин}^{-1} \times 10^3$		$k' = k/(m \times S_{\text{уд}})$, $\text{мин}^{-1} / \text{м}^2 \times 10^3$	
		МС	РБ	МС	РБ	МС	РБ
1V	92	80,52	49,85	5,5	3,5	119,6	76,1
2V	185	83,67	60,30	9,3	4,5	100,5	48,6
3V	277	85,64	67,25	11,3	6,5	81,5	49,1
4V	368	92,00	79,06	14,6	8,0	79,34	43,5
5V	460	93,92	85,54	16,6	10,1	72,17	43,9
Без слоя	0 (мембрана без слоя)	40,46	28,67	2,6	1,7		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы разработаны коллоидно-химические основы получения на поверхности керамических трубчатых мембран нанесенных слоев V_2O_5 золь-гель методом. Полученные мембраны проявляют каталитическую активность в реакции разложения красителей в водных растворах. По проведенной работе можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны основные стадии синтеза зольей $V_2O_5 \cdot nH_2O$ термолизом грубодисперсного V_2O_5 в присутствии пероксида водорода, установлен минимальный избыток $[H_2O_2]:[V_2O_5]=30$ моль/моль, необходимый для формирования наночастиц, и

концентрационная область V_2O_5 (0,3-1,6% мас.), в которой возможно образование агрегативно устойчивых золей.

2. Получен комплекс данных о коллоидно-химических свойствах золей, синтезированных с разной исходной концентрацией V_2O_5 (концентрация соединений ванадия в нерастворенной и растворенной формах, размер, форма и химический состав частиц, вязкость золей, знак и величина электрокинетического потенциала, влияние pH дисперсионной среды и содержания индифферентного электролита на агрегативную устойчивость), что позволило выбрать условия формирования нанесенных слоев.

3. Впервые получен комплекс данных о фазовом составе, удельной поверхности, пористых характеристиках ксерогелей и нанесенных слоев $V_2O_5 \cdot 1,6H_2O$, а также продуктах их термического разложения, что позволило выбрать режим термообработки нанесенных слоев.

4. Разработаны основные этапы нанесения слоев V_2O_5/Al_2O_3 с применением синтезированных золей аналогом метода нафильтровывания. Метод позволяет наносить слои V_2O_5/Al_2O_3 за одну стадию и закреплять слои на поверхности за один цикл сушки и термообработки с удельной массой нанесенного слоя (до 9 мг/см²). Показано влияние условий нанесения на свойства каталитических мембран.

5. Определены оптимальные условия термообработки (650°C), при которых достигается хорошая адгезия к поверхности мембран на основе $\alpha-Al_2O_3$. Определен диапазон величин pH растворов (2,0-8,0), в которых нанесенные слои сохраняют химическую стабильность.

6. Установлена каталитическая активность мембран V_2O_5/Al_2O_3 в процессе разложения органических красителей метиленового синего и Родамина Б в разбавленных водных растворах в присутствии пероксида водорода в условиях видимого света (без дополнительного УФ излучения), которая на порядок превышает каталитическую активность порошковых катализаторов на основе V_2O_5 .

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные результаты могут являться базовыми для дальнейших работ по получению различных нанесенных катализаторов на основе V_2O_5 . Для дальнейшего развития темы рекомендуется провести более детальные исследования каталитической активности мембран с нанесенными слоями в реакциях жидкофазного окисления. Полученные результаты также могут быть использованы при разработке мембранных реакторов для

проведения газофазных процессов, в которых V_2O_5 проявляет каталитическую активность, в частности, для производства малеинового ангидрида из н-бутана и пропилена из пропана.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, кандидату химических наук, доценту Яровой Оксане Викторовне, за неоценимую помощь на всех этапах работы над диссертацией, а также сотрудникам ЦКП РХТУ имени Д. И. Менделеева, Аналитического центра ИОФ РАН имени А. М. Прохорова и ЦКП ФМИ ИОНХ РАН имени Н. С. Курнакова за проведение части экспериментальных исследований по определению характеристик нанесённых слоёв с использованием современного высокоточного оборудования..

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V. Photocatalytic degradation of methylene blue dye with H_2O_2 over ceramic membrane with supported layer V_2O_5 . // *Advances in Ecology and Environmental Engineering. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* Springer, Cham. – 2024 – P. 203 - 215. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8_18. (*Scopus*)
2. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V. Colloidal chemical properties of the sol $V_2O_5 \cdot nH_2O$. // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics (Наносистемы: физика, химия, математика).* – 2024 – Vol. 15(4) - P. 487 - 497. DOI: 10.17586/2220-8054-2024-15-4-487-497. (*BAK, Scopus. Web of Science. PIHЦ*)
3. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V., Senina M. O., Kuznecov M. Yu. Deposition of selective vanadium-containing layers on the external surface of $\alpha-Al_2O_3$ tubular ceramic membranes// *Glass and Ceramic.* – 2025 – Vol.82. № 3-4 - P. 108-115. DOI 10.1007/s10717-025-00757-7 (*Scopus, Web of Science, PIHЦ*)
4. **Hein M.L.**, Yarovaya O.V, Senina M.O. Sol-gel fabrication of hydrated vanadium (V) oxide and analysis of its xerogel properties, // *International Research Journal (Международный научно-исследовательский журнал) № 4 (154).* DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.21. (*BAK, GeoRef*)
5. **Hein Myat Lwin**, O. V. Yarovaya, M. O. Senina. Catalytic degradation of Rhodamine B dye using hydrogen peroxide over ceramic membrane supported by vanadium (V) oxide layer. // *Вестник Башкирского университета. - 2025. Т. 30. №1 P. 45-50.* DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.1.7 (*BAK*)

6. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Разработка способа получения дисперсий V_2O_5 для получения нанесенных слоев на внешней поверхности трубчатых мембран на основе Al_2O_3 . // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXVI, № 13 (262). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. - 2022. – С 132 - 134. (РИНЦ)
7. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Получение каталитически керамических мембран со слоем V_2O_5 // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов, VII Всероссийская научная конференция (с международным участием) г. Иваново – Суздаль. – 2023. – С 521 – 523
8. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Окисление красителя метиленового синего на керамических мембранах с нанесенными активными слоями на основе V_2O_5 // Международная научно-практическая конференция Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. г. Севастополь - 2023. – С 121 – 123. (РИНЦ)
9. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Исследование получения и некоторых свойств золя $V_2O_5 \cdot nH_2O$ // X молодежная школа-конференции «Современные аспекты химии» г. Пермь, ПГНИУ. -2023. – С 172 - 175. (РИНЦ)
10. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Анализ влияния pH на химическую стабильность нанесенных катализаторов на основе V_2O_5 // Международная научно-практическая конференция «Научное измерение - 2023» г. Петрозаводск. – 2023. – С 128 - 132.
11. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V. Some properties of the $V_2O_5 \cdot nH_2O$ sol, which was obtained by thermolysis of V_2O_5 powders with hydrogen peroxide. // VI Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике (IC CSCPМ), посвященная 125-летию со дня рождения П.А. Ребиндера. Казань. – 2023 – Р. 102 - 102.
12. **Хеин Мьят Лвин**, Яровая О. В. Анализ химической стабильности нанесенных катализаторов на основе V_2O_5 в средах с различными значениями pH. // X Всероссийская конференция (с международным участием) «Высокотемпературная химия оксидных систем и материалов», Санкт-Петербург. -2023. С. 230-232. (РИНЦ)
13. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V. Optimization of Conditions for the Preparation of Ceramic Membrane with Catalytically Active Layer of V_2O_5 . // XXVIII всероссийская конференция молодых ученых-химиков) Нижний Новгород. – 2025 – Р. 589-589.
14. **Hein Myat Lwin**, Yarovaya O. V., Senina M. O. Physicochemical Properties of $V_2O_5 \cdot 1.6H_2O$ xerogel. // XXVIII всероссийская конференция молодых ученых-химиков (с международным участием) , Нижний Новгород – 2025 – Р. 501-501.