

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

РХТУ.2.6.08 РХТУ им. Д.И. Менделеева
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № 30/23
решение диссертационного совета
от 08.12.2023 г. № 2

О присуждении ученой степени кандидата технических наук Атласкиной Марии Евгеньевне, представившей диссертационную работу на тему «Физико-химические основы технологии мембранно - абсорбционного газоразделения (МАГ) для удаления диоксида углерода из метансодержащих газовых смесей» по научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

Принята к защите 27.10.2023 г, протокол № 1 диссертационным советом РХТУ.2.6.08 РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 11 человек приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 352А от «08» сентября 2022 г.

Соискатель Атласкина Мария Евгеньевна 1994 года рождения, гражданка Российской Федерации. В 2018 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) по направлению подготовки 11.04.04. «Электроника и наноэлектроника» профиль магистерской программы «Физика, химия и технология поверхностей и межфазных границ» диплом серия 105205 номер 0133628 от 04 июля 2018 г.

Обучалась в аспирантуре НГТУ им. Р.Е. Алексеева на кафедре «Нанотехнологии и биотехнологии» с 1 октября 2018 г. по 30 сентября 2022 г., с 19 сентября 2022 г. работала ведущим инженером лаборатории «SMART полимерных материалов и технологий» РХТУ им. Д.И. Менделеева. В настоящее время Атласкина М.Е. работает м.н.с. лаборатории ионных материалов Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева.

С 01 февраля 2023 г. по 31 мая 2023 г. была зачислена для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программ подготовки научных и научно-педагогических кадров на кафедру физической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор, и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева Воротынцев Илья Владимирович.

Официальные оппоненты:

Доктор химических наук, Пенькова Анастасия Владимировна, профессор кафедры аналитической химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет».

Кандидат химических наук, Дибров Георгий Альбертович, доцент кафедры Мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены в 10 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 3 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных. По результатам диссертационной работы получен 1 патент РФ. Недостоверные сведения об опубликованных работах в диссертации отсутствуют.

Наиболее значительные работы:

1. Atlaskina M.E., Atlaskin A.A., Kazarina O.V., Petukhov A.N., Zarubin D.M., Nyuchev A.V., Vorotyntsev A.V., Vorotyntsev I.V. / Synthesis and comprehensive study of quaternary-ammonium-based sorbents for natural gas sweetening // Environments – MDPI, 2021.-V. 8, 134. (Scopus, Web of Science).

2. Atlaskin A.A., Kryuchkov S.S., Smorodin K.A., Markov A.N., Zarubin D.M., Atlaskina M.E., Vorotyntsev A.V., Nyuchev A.V., Petukhov A.N., Vorotyntsev I.V. / Towards the potential of trihexyltetradecylphosphoniumindazolide with aprotic heterocyclic ionic liquid as an efficient absorbent for membrane-assisted gas absorption technique for acid gases removal applications // Separation and Purification Technology, 2020.-Vol. 257, DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117835 (Scopus, Web of Science).

3. Sazanova, T.S., Akhmetshina, A.I., Petukhov, A.N., Vorotyntsev, A.V., Suvorov, S.S., Barysheva, A.V., Mechergui, A., Nyuchev, A.V., Kazarina, O.V., Stepakova, A.N., Atlaskina, M.E., Atlaskin, A.A., Kryuchkov, S.S., Vorotyntsev, I.V. / The Cation Effect on the Free Volume and the Solubility of H₂S and CO₂ in Ionic Liquids Based on Bis(2-Ethylhexyl) Sulfosuccinate Anion // Membranes, 2023.- Vol.13 Issue 2, 238. DOI: 10.3390/membranes13020238. (Scopus, Web of Science).

4. Атласкин А.А., Крючков С.С., Воротынцев А.В., Петухов А.Н., Трубянов М.М., Атласкина М.Е., Воротынцев И.В. Способ удаления диоксида углерода и сероводорода из метансодержащих газовых смесей. Патент на изобретение № 2768147 С1, 23.03.2022. Заявка № 2020142596 от 23.12.2020.

Все работы опубликованы в соавторстве. Личный вклад автора составляет 50 – 90 % и заключается в непосредственном участии в планировании работ, проведении экспериментов, анализе, обсуждении и обобщении полученных результатов, подготовке работ к публикации.

Результаты диссертации представлены на 6 международных и всероссийских конференциях:

1. Атласкина М.Е., Воротынцев И.В. Разработка материалов для повышения эффективности удаления кислых газов из природного газа // XIX Всероссийская молодежная научно-техническая конференция, посвященная 75-летию Победы в Великой Отечественной войне «Будущее технической науки». Сборник материалов. Нижний Новгород. 08.10. 2020, С. 339.

2. Атласкина М.Е., Атласкин А.А., Казарина О.В., Воротынцев И.В. Разработка комплексного подхода к интенсификации процесса очистки природного газа // XXVI Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные науки). Сборник материалов. Нижний Новгород. 2021 год. С. 212-213.

3. Атласкина М.Е., Казарина О.В., Петухов А.Н., Атласкин А.А., Нючев А.В., Зарубин Д.М., Воротынцев И.В., Воротынцев А.В. Разработка сорбентов на основе четвертичного аммония для очистки природного газа от диоксида углерода // XXV Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием). Сборник материалов. Нижний Новгород. 2022. С.265.

4. Атласкина М.Е., Казарина О.В., Атласкин А.А., Петухов А.Н., Воротынцев А.В., Воротынцев И.В. Разработка новых эффективных сорбентов CO₂ XXI Всероссийской молодежной научно-технической конференции, посвященной 105-летию Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексея «Будущее технической науки». Сборник материалов. 2022. С. 358-359.

5. Атласкин А.А., Атласкина М.Е., Крючков С.С., Воротынцев А.В., Воротынцев И.В. Экспериментальная оценка эффективности удаления кислых газов из природного газа и биогаза методом мембранно-абсорбционного газоразделения с использованием ионных жидкостей в качестве абсорбента // XXVI Всероссийская конференция «Структура и динамика молекулярных систем», 17-я Школа молодых ученых «Синтез, структура и динамика молекулярных систем». Сборник материалов. Яльчик. 2020. С. 14-15.

6. Зарубин Д.М., Атласкина М.Е., Казарина О.В., Петухов А.Н., Атласкин А.А., Крючков С.С., Смородин К.А., Воротынцев И.В., Воротынцев А.В. Изучение сорбционных свойств материалов на основе ионных жидкостей методом обратной газовой хроматографии

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

- 1. Отзыв официального оппонента** - доктора химических наук, **Пеньковой Анастасии Владимировны**, профессора кафедры аналитической химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет». В отзыве отражена актуальность темы, научная новизна, практическая значимость, достоверность и надежность полученных данных. **Отзыв положительный.** Имеются следующие замечания и вопросы по диссертации:
 1. В работе имеется незначительное число опечаток, грамматических и стилистических ошибок («по сравнению с другими аминами обладает характеризуется меньшей теплотой реакции с» стр. 5, «по составу к природному газу восьмикомпонентной газовых смесей.» стр. 7, «экспериментальной работе по оценке их эффективности. , а также...» стр. 8, «энергии. в отличие» стр. 10 , «создание ассиметричных мембран», «В работе [48] представлен метод комбинации газоразделительных мембран с движущимися жидкими носителями который (мембранный контактор)» стр. 22 , «в качестве абсорбента использовался раствора МЭА с K_2CO_3 » стр. 23, «Подбора абсорбента – особенно важная задача» стр. 23, «Определены их абсорбционные свойства по отношению к CO_2 .» стр. 103 и др.).
 2. Почему пункты 1 и 3 «Задачи работы» связаны только с CO_2 (не упомянут H_2S)?
 3. Не совсем верно утверждение «Прорывом в промышленном применении мембран является создание ассиметричных мембран. Они состоят из плотного поверхностного слоя толщиной от 0.1 до 5 мкм, нанесенного на пористую подложку толщиной от 50 до 150 мкм.» Как правило, ассиметричная мембрана состоит из одного материала и готовится не путем нанесения на подложку, а путем формирования ассиметричной структуры, например, методом инверсии фаз.
 4. Почему сорбционные свойства ионных жидкостей определены разными методами? Так $[HPyr][Doc]$, $[EMPyrr][Doc]$ и $[P_{66614}][Inda]$ исследовались манометрическим методом, а $[BHEDMA][Tau]$, $[BHEDMA][Ac]$ и $[BHEDMA][Gly]$ - методом обращенной газовой хроматографии?
 5. В разделе 2.9 «Оценка эффективности мембранно-абсорбционного метода газоразделения на примере полволоконного модуля» не приведены размеры полволоконного модуля. Каковы его геометрические размеры и есть ли возможность масштабирования, для внедрения на реальные производства?
 6. В том же разделе автор пишет, что «в качестве кожуха мембранного модуля было использовано оргстекло из полиметилметакрилата, чтобы иметь возможность визуально контролировать процесс». Не совсем понятно, что имеет в виду автор. Какие параметры процесса могут контролироваться визуально?
 7. В том же разделе не указано как реализуется поддержание температуры процесса мембранно-абсорбционного газоразделения.
 8. Чем обоснован выбор диапазона доли отбора в мембранно-абсорбционном газоразделении от 0.001 до 0.07?
 9. Применение МАГ модуля в конфигурации волокно в волокне представляется перспективным направлением в оптимизации газоразделительных процессов. Каким образом планируется производство таких модулей для реального газоперерабатывающего сектора и каковы критические проблемы масштабирования могут возникнуть при производстве?
- Заключение по работе положительное. Замечания носят частный характер, не снижают значимости полученных результатов и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку работы. Представленная диссертационная работа является актуальной, законченной по характеру исследований в рамках поставленных задач и выполненной на высоком уровне. Достоверность полученных результатов обоснована применением современного аналитического оборудования, проверенных и сертифицированных методик экспериментов. Все эксперименты описаны подробно,

полученные выводы научно обоснованы и не противоречат друг другу.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы

Диссертационная работа Атласкиной Марии Евгеньевны на тему «Физико-химические основы технологии мембранно - абсорбционного газоразделения (МАГ) для удаления диоксида углерода из метансодержащих газовых смесей» по объему, актуальности, научной новизне, практической и теоретической значимости удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

Работа полностью соответствует паспорту специальности 2.6.15 Мембраны и мембранные технологии (п.5 мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией); п.7 - Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, и методов борьбы с этим явлением.).

2. **Отзыв официального оппонента** - кандидата химических наук, **Диброва Георгия Альбертовича**, доцента кафедры Мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева. В отзыве отражены актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, достоверность результатов и выводов. Отзыв положительный. Имеются следующие замечания и вопросы по диссертации:

1. В разделе 2.9 «Оценка эффективности мембранно-абсорбционного метода газоразделения на примере волоконного модуля» не приведены размеры газоразделительного модуля. Неясно, каково общее число газоразделительных волокон помещено в модуль? Какой объем абсорбента необходим для заполнения межмембранного пространства?

2. В этом же разделе (2.9) отсутствует обоснование выбранных условий проведения процесса мембранно-абсорбционного газоразделения. Чем обоснован выбор давления питающей смеси – 0.4 МПа.

3. Было бы интересно сравнить системы МДЭА 50%/вода 50% и МДЭА 30%/вода 50%/[BHEDMA][Gly] 20%, вместо системы МДЭА 30%/вода 70% и МДЭА 30%/вода 50%/[BHEDMA][Gly] 20%.

Заключение по работе положительное. Замечания к работе не имеют принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Представленная работа является актуальной, законченной по характеру исследований в рамках поставленных задач и выполненной на высоком уровне. Экспериментальный материал получен с помощью современного аналитического оборудования и является достоверным и оригинальным. Подходы к исследованию хорошо продуманы. Интерпретация результатов выполнена на основе современных научных представлений в области исследования мембранной и химической технологии.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы

Диссертационная работа Атласкиной Марии Евгеньевны на тему «Физико-химические основы технологии мембранно - абсорбционного газоразделения (МАГ) для удаления диоксида углерода из метансодержащих газовых смесей» по объему, актуальности, научной новизне, практической и теоретической значимости удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего

образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

Работа полностью соответствует паспорту специальности 2.6.15 Мембраны и мембранные технологии (п.5 мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией); п.7 - Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, и методов борьбы с этим явлением.).

3. Отзыв ведущей организации - федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени **Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева** Российской академии наук (ИНХС РАН). В отзыве отражена актуальность исследования, анализ содержания диссертационной работы, практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов. Отзыв положительный.

Вопросы и замечания по работе:

1. В работе не представлено сравнение разработанного мембранно-абсорбционного метода газоразделения с классическим методом абсорбции водными растворами алканоламинов.

2. Каким образом в МАГ модуле реализуется десорбция растворенных газов?

3. Каково отношение площади мембраны к объему МАГ аппарата в полскорамном и половолоконном вариантах? Каково отношение объема абсорбента к объему очищаемого газа в этих случаях?

4. Возможно ли масштабирование метода мембранно-абсорбционного газоразделения по аналогии с традиционными мембранными методами?

5. В работе сделан акцент на удаление диоксида углерода из природного газа, однако природный газ поступает на объекты газопереработки под давлением до 100 атмосфер. Декомпрессия газового потока является нежелательной, поскольку в дальнейшем потребуются его повторное компримирование, что достаточно энергозатратно. Какое давление способна выдержать предлагаемая МАГ система?

6. Для каких разделительных задач предпочтительнее использование плоскорамных мембранно-абсорбционных газоразделительных модулей, а для каких – половолоконных модулей?

Заключение по работе положительное. Отмечено, что приведенные замечания не снижают научную значимость представленных в диссертационной работе результатов и не влияют на ее положительную оценку.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы

По тематике, методам исследования и полученным результатам диссертационная работа Атласкиной М.Е. на тему «Физико-химические основы технологии мембранно - абсорбционного газоразделения (МАГ) для удаления диоксида углерода из метансодержащих газовых смесей» соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.15 Мембраны и мембранные технологии (технические науки) в п.5 «Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией)» и п.7 «Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная

поляризация, и методов борьбы с этими явлениями»

Также работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

4. **Отзыв на автореферат** кандидата химических наук, с.н.с. лаборатории технологий получения веществ электронной чистоты, НИИ химии, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» **Логунова Александра Александровича**. Отзыв положительный. Имеются следующие вопросы:

5. С какой целью вакуумировалось подмембранное пространство при реализации процесса газоразделения в радиальном модуле с плоской мембраной?

6. Возможна ли замена дорогостоящего гелия, используемого для продувки полости низкого давления, при реализации процесса газоразделения в модуле на полых волокнах?

5. **Отзыв на автореферат** кандидата химических наук, научного секретаря Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии национальной академии наук Беларуси» **Праценко Светланы Анатольевны**. Отзыв положительный. По автореферату имеются некоторые вопросы и замечания:

1. В тексте автореферата отсутствует комментарий к экспериментальным данным, представленным в таблице 2. Думаю, интерпретация полученных результатов есть в тексте диссертации.

2. В каком варианте возможно внедрение данной технологии в реальные производства? На каком этапе переработки природного газа это возможно осуществить?

3. Какова эффективность удаления примесей кислых газов методом мембранно-абсорбционного газоразделения по сравнению с альтернативными методами?

6. **Отзыв на автореферат** ведущего научного сотрудника кафедры физической и коллоидной химии ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», кандидата технических наук **Семенова Антона Павловича**.

Представленные в автореферате результаты исследований позволяют заключить, что все положения и научные выводы аргументированы и подкреплены большим объемом экспериментальных работ. По результатам работы были опубликованы 3 научные статьи в высокорейтинговых журналах, обсуждены на конференциях и получен патент. Отзыв положительный. Однако при прочтении автореферата возникает ряд вопросов и замечаний:

1. В работе не указаны размеры половолоконного МАГ модуля.

2. Каким образом возможно внедрение данной разработки в реальные промышленные процессы газоразделения?

7. **Отзыв на автореферат** профессора кафедры «Химии и технологии переработки эластомеров» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доктора технических наук, доцента **Хузаханова Рафаиля Мухаметсултановича**. Отзыв положительный. После прочтения автореферата возник ряд вопросов:

1. Из текста автореферата непонятно, как проводился синтез ионных соединений, хотя в научной новизне это приведено.

2. Проводилось ли технико-экономическое обоснование предложенной технологии?

3. Чем обосновано рабочее давление в процессе мембранно-абсорбционного газоразделения в 0.4 МПа?

На все замечания Атласкиной Марией Евгеньевной даны полные и исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации основывается на компетентности оппонентов в соответствующей отрасли науки, наличия у них публикаций по научной специальности и тематике защищаемой диссертационной работы. В качестве ведущей организации выбрана организация, широко известная своими достижениями в соответствующей отрасли науки и способная определить научную и практическую ценности диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **Получены** ионные соединения методом ионного обмена для задач абсорбции диоксида углерода.

2. **Применены** водные растворы на основе метилдиэтанолamina с ионными жидкостями [BHEDMA][Tau] и [BHEDMA][Gly] в качестве абсорбентов диоксида углерода.

3. **Решена** научно-техническая задача оптимизации процесса газоразделения. Проведена экспериментальная оценка эффективности мембранно-абсорбционного метода газоразделения с точки зрения основных показателей процесса, а именно, степени извлечения углеводородов и количества удаленных кислых газов из метан - содержащих газовых смесей на примере разделения двух бинарных газовых систем CH_4/CO_2 и $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{S}$, трехкомпонентной и восьмикомпонентной газовых смесей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

предложены метод оптимизации процесса подготовки природного газа - мембранно-абсорбционное газоразделение; новые абсорбенты диоксида углерода: ионные жидкости, растворы на основе метилдиэтанолamina, имеющие в качестве компонента, повышающего их сорбционную емкость, новые ионные жидкости;

разработан мембранно-абсорбционный газоразделительный модуль;

показана возможность оптимизации процесса очистки природного газа от примеси диоксида углерода методом мембранно-абсорбционного газоразделения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

показана эффективность применения абсорбционных растворов на основе метилдиэтанолamina с новыми ионными жидкостями для интенсификации процесса очистки природного газа от примеси диоксида углерода.

разработан мембранно-абсорбционный газоразделительный модуль, который позволит оптимизировать процесс подготовки природного газа методом мембранно-абсорбционного газоразделения. Данный модуль сочетает в себе абсорбцию газов жидкими абсорбентами с мембранным газоразделением и может использоваться как вместо процесса аминовой очистки, так и вместе с ним, путем внедрения модуля в технологические схемы очистки газа.

создана установка для проведения процесса мембранно-абсорбционного газоразделения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном высокоточном аналитическом оборудовании с использованием современных научно-исследовательских методов и стандартизированных методик;

теория базируется на известных закономерностях массопереноса через полимерные газоразделительные мембраны, массообмена в абсорбционных системах и функционирования газоразделительных аппаратов.

Личный вклад соискателя:

Личный вклад автора заключается в непосредственном формулировании и обосновании целей и задач, выборе методов исследования, проведения анализа и обработке полученных результатов. Автор синтезировал и охарактеризовывал ионные соединения, проектировал экспериментальную установку для определения абсорбционной емкости растворов к компонентам в газовой смеси, принимал непосредственное участие в постановке задач, проектировании и апробации мембранно-абсорбционных модулей и экспериментальной работе по оценке их эффективности, а также статистической обработке

