

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Пояркова Андрея Александровича**
на тему «**Интенсификация процессов массопереноса с использованием
мембранных контакторов на основе нанопористых мембран**»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научным специальностям

2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки)

2.6.17. Материаловедение (технические науки)

Общая характеристика работы

Диссертационная работа Пояркова А.А. посвящена разработке технических решений для селективного извлечения компонентов из газовых сред с использованием мембранных контакторов газ/жидкость, позволяющих реализовать осушение влагонасыщенных газовых сред до точки росы подготовленного газа по воде с использованием растворов триэтиленгликоля в качестве абсорбентов, а также в комбинированном абсорбционно-конденсационном процессе; очистку газовых сред от кислых компонентов с использованием растворов моноэтаноламина и NaOH в качестве абсорбентов.

Для мембранного абсорбционно-конденсационного осушения газов показаны основные закономерности эффективности извлечения компонентов от их содержания в исходном газе, степени насыщения жидкого абсорбента, предельной емкости абсорбента, потоков жидкой и газовой сред, давления процесса, температуры и трансмембранного давления.

Разработан способ поверхностной модификации полуволоконной нанопористой мембраны из полипропилена путем создания покрытия на основе фторсодержащих функциональных групп. Предложены новые ультратонкие (до 50 нм) композиционные капиллярно-пористые мембраны на основе слоев оксида графена для процессов осушения газов.

Актуальность работы

Актуальной проблемой нефтегазоперерабатывающей отрасли в России и за рубежом является очистка природного и попутного нефтяного газа от серосодержащих и «кислых» компонент, а также осушение газа для его дальнейшего компримирования и подачи в трубопроводный транспорт. В настоящее время задачи очистки и осушения газа

решаются традиционными рефрижераторными, адсорбционными или абсорбционными методами, обладающими рядом недостатков (такими как высокая энергоемкость и значительные массогабаритные характеристики массообменных устройств). Развивающейся в настоящее время альтернативой являются мембранные технологии, совершенствованию одной из которых посвящена работа соискателя.

Научная новизна

Соискателем определены основные закономерности процесса селективного удаления компонентов газовых смесей в мембранных контакторах. Полученные экспериментальные данные описаны с использованием разработанной математической модели массопереноса в газожидкостном мембранном контакторе, учитывающей стереометрию системы, распределение скоростей потоков и диффузию компонентов в газовой и жидкой фазах, диффузию через поры мембраны, абсорбцию компонентов жидким абсорбентом на границе раздела газ/жидкость, а также химические равновесия в жидком абсорбенте. На основании проведенных экспериментов и результатов моделирования в диссертации показано, что ключевыми параметрами, влияющими на эффективность работы мембранных контакторов, являются перепад межфазного давления, определяющий режим массопереноса через поры мембраны, диссоциация и диффузия извлекаемых компонентов (или продуктов) в слое жидкого абсорбента. Автором работы обнаружен синергетический эффект, основанный на одновременной конденсации и абсорбции конденсирующихся паров в охлажденный жидкий абсорбент, использованный для создания мембранного абсорбционно-конденсационного контактора с улучшенной энергоэффективностью.

Практическая значимость

Работоспособность технологии очистки попутных нефтяных газов от сероводорода и углекислого газа с использованием пертракции на нанопористых мембранах была подтверждена в ходе промышленных испытаний (Нефтегорский газоперерабатывающий завод ПАО «НК «Роснефть», 08.2017; УПСВ Гаршино ПАО «Оренибургнефть», 11-12.2019; 10-12.2022) с использованием полуволоконных мембранных элементов 20x700 и 50x700 с эффективной площадью поверхности мембраны 0,84-6,43 м². Результаты испытаний частично опубликованы в открытой печати. Предложенные технические и технологические решения и разработки защищены патентами на изобретения, что свидетельствует о практической значимости диссертации.

Достоверность результатов и выводов

Достоверность полученных соискателем результатов обусловлена использованием комплекса взаимодополняющих инструментальных методов физико-химического исследования при определении состава, структуры и свойств материалов (сканирующей электронной микроскопии, малоуглового рассеяния рентгеновского излучения, ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния, измерения контактных углов смачивания, определения газовой и жидкостной проницаемости мембранных материалов, а также компонентного анализа состава сырьевого и пермеатного потоков с помощью газовой хроматографии). Для достижения цели исследования соискателем были применены традиционные методы и подходы к анализу элементного состава, химического строения и структуры экспериментальных образцов (растровая электронная микроскопия, ИК-Фурье спектроскопия, КР-спектроскопия и другие).

Содержание

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В главе I (литературный обзор) представлены:

- описание классических технологий газоподготовки, в том числе методов низкотемпературной сепарации и конденсации; методов сверхзвуковой газодинамической сепарации; адсорбционных методов подготовки газов, основанных на поглощении примесей твёрдыми и жидкими абсорбентами; адсорбционных методов очистки газов от кислых компонентов;

- описание мембранных материалов и технологий, в том числе мембранных технологий газоразделения; явлений массопереноса в непористых мембранах; механизмов распространения газов через пористые среды (вязкостный поток; кнудсеновская, конфигурационная и поверхностная диффузия; капиллярная конденсация); принципов мембранной подготовки газов; непористых полимеров для очистки и осушения газов (на основе блок-сополимеров; на основе слоистых квазидвумерных материалов); пористых мембранных материалов; технологии очистки газовых смесей от кислых компонентов методом пертракции на пористых мембранных контакторах; примеров промышленных испытаний мембранных контакторов

- постановка научной задачи диссертационного исследования, в том числе сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальной части исследования. В ней описаны методики формирования и поверхностной модификации полуволоконных мембран на основе полипропилена, описана технология синтеза мембран на основе оксида графена, а также дано описание экспериментального оборудования, методов исследования структуры и свойств полученных мембранных материалов. Детально описана реализация исследования структуры мембран оксида графена в процессе осушения газа в режиме эксплуатации с использованием рассеяния рентгеновского излучения. Представлены технические схемы использованных в работе систем для тестирования мембранных контакторов газ-жидкость и описаны эксперименты по осушению газов на мембранном контакторе газ-жидкость, удалению кислых газов CO_2 и H_2S растворами NaOH и моноэтаноламина (МЭА).

В третьей главе представлена разработанная математическая модель массопереноса в контакторе газ-жидкость и информационная система компьютерного моделирования процесса удаления компонентов из газовых смесей. Система предназначена для расчета концентрационных полей компонентов в жидкой и газовой фазах при реализации комбинированной технологии, основанной на использовании межфазных мембранных контакторов в процессе извлечения компонентов газа в жидкий абсорбент через пористую мембрану. В информационной системе учтены аспекты геометрии системы, распределения скоростей потоков и диффузии компонентов в газовой и жидкой фазах, массопереноса при протекании жидких и газовых сред в наноразмерных каналах, абсорбции компонентов жидким абсорбентом на границе раздела газ/жидкость, а также химические равновесия в жидком абсорбенте. Реализованы широкие возможности параметризации процесса, а также выполнена визуализация концентрации кислых компонентов в очищаемом газе и абсорбенте. Представлены результаты моделирования, иллюстрирующие роль кинетических констант адсорбции и диссоциации сероводорода.

Несмотря на схожие зависимости остаточного парциального давления от степени насыщения абсорбента при ограничении процесса по стадиям адсорбции и диссоциации кислых компонентов, наилучшее теоретическое описание экспериментальных данных достигается при ограничении скорости химической реакции диссоциации и без кинетических ограничений процесса адсорбции. Это хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемым различием в эффективности контактора в процессах абсорбции CO_2 и H_2S при одинаковой продолжительности контакта фаз.

На основе совокупности экспериментальных данных и моделирования установлено, что эффективность поглощения кислых газов в водные абсорбенты

лимитируется константой скорости диссоциации. На основании моделирования также установлено, что ключевым параметром, определяющими эффективность и производительность процесса пертракции, является массообмен в фазе жидкого абсорбента.

В четвертой главе дана характеристика микроструктуры полволоконных полипропиленовых мембран, использованных в работе в качестве основных мембранных контакторов. Соискателем были реализованы и протестированы способы осушения и очистки газовых смесей жидкими абсорбентами с использованием мембранных контакторов. Нанопористая мембрана действует как барьер между фазами и определяет границу раздела фаз. Площадь контакта определяется исключительно плотностью упаковки мембраны и достигает значений $10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Эта величина превышает площадь контакта традиционных контакторных устройств как минимум на порядок, что позволяет существенно снизить их массогабаритные характеристики.

Предложенная система абсорбционного осушения газа на основе мембранных контакторов с использованием триэтиленгликоля в качестве абсорбента демонстрирует высокую эффективность удаления паров воды. При этом точка росы подготовленного газа практически не зависит от давления газа, а степень извлечения паров воды ожидаемо уменьшается с уменьшением давления газа и степенью насыщения жидкого абсорбента водой. Для увеличения эффективности мембранно-абсорбционного процесса была предложена и протестирована технологическая схема комбинированного абсорбционно-рефрижераторного способа осушения газов с использованием нанопористых мембранных контакторов. Предлагаемая схема предполагает осушение газовой фазы за счет конденсации и абсорбции паров в охлаждаемый жидкий абсорбент (смесь этиленгликоль-вода). При этом малая толщина стенок мембраны определяет высокую эффективность теплообмена.

Согласно проведенным экспериментам, эффективность удаления паров воды немного уменьшается при увеличении потока осушаемого газа и достаточно существенно зависит от содержания воды в этиленгликоле.

Альтернативой традиционным системам удаления кислых компонентов из газовых смесей в работе представлены мембранные контакторы на основе полых полипропиленовых волокон с использованием щелочных и аминных абсорбентов. Были установлены основные закономерности по эффективности извлечения в зависимости от содержания извлекаемых компонентов в исходном газе, степени насыщения абсорбента,

его предельной емкости, потоков жидкой и газовой сред, давления процесса, температуры и трансмембранного давления.

Согласно полученным данным использование мембранных контакторов с щелочным абсорбентом оказывается эффективным. При этом эффективность извлечения кислых компонентов незначительно уменьшается при увеличении потока кислого газа и увеличении его концентрации и возрастает при повышении общего давления и скорости потока жидкого абсорбента. Последнее, согласно результатам моделирования процесса пертракции, хорошо объясняется пересыщением примембранного слоя недиссоциированными частицами.

Использование щелочного абсорбента также позволяет удалять меркаптаны с эффективностью, достигающей 99% для свежего абсорбента. Существенное различие в константах скорости поглощения сероводорода и углекислого газа позволяет эффективно использовать время контакта фаз для селективного удаления. Исследование долговременной стабильности показало незначительное снижение эффективности газопоглощения после 6 месяцев эксплуатации в щелочном абсорбенте с сохранением микроструктуры и химического состава мембраны, что позволяет эффективно удалять кислые компоненты из газовых смесей, демонстрируя достаточную стабильность с щелочным абсорбентом, а утилизация насыщенного абсорбента может быть реализована в системе поддержания пластового давления.

При существенном загрязнении газа кислыми компонентами особенно важно использование регенерируемых абсорбентов, таких как растворы моноэтаноламина. В работе было проведено исследование эффективности удаления CO_2 и H_2S от степени насыщения абсорбента при различных концентрациях абсорбента, давлениях и удельных расходах сырьевой смеси. Были установлены основные закономерности, иллюстрирующие улучшение качества подготавливаемого газа при снижении концентрации моноэтаноламина и увеличении давления газа. Проведенные исследования также показали применимость способа для очистки газа до требований СТО Газпром 089-2010.

Для увеличения стабильности нанопористых мембран была проведена их поверхностная модификация с применением фторирования, трифторметилирования и перфторалкилирования, а также созданы тонкие селективные слои на основе оксида графена. Применение перфторалкилирования привело к росту контактного угла смачивания водой, однако также увеличился гистерезис контактных углов, что способствовало заполнению пор жидкой фазой. Прямое фторирование с использованием XeF_2 привело к увеличению контактных углов не более чем 10° , указывая на однородную

модификацию поверхности волокна. Для модифицированных мембран наблюдалось снижение количества адсорбированной воды и было показано увеличение эффективности осушения газа в процессе пертракции, что определяет перспективы использования поверхностно-модифицированных нанопористых мембран в контакторных приложениях.

Для создания барьерных мембран с тонким высокопроницаемым селективным слоем в работе изучены композиционные мембраны на основе оксида графена (ОГ). Наличие барьерного слоя делает такие мембраны непроницаемыми для большинства крупных частиц и ионов, что обуславливает их применимость в процессах первапорации и жидкостного разделения. В то же время, данные по проницаемости оксида графена существенно разнятся в литературе, а межслоевое расстояние в структуре оксида графена существенно изменяется с варьированием парциального давления паров воды. Это обусловило необходимость проведения экспериментальных исследований по проницаемости оксида графена при различных условиях и установления механизма транспорта паров воды через такие мембраны.

Для установления корреляций структурных и транспортных характеристик оксида графена в работе были использованы мембраны с тонкими селективными слоями ОГ (100 нм - 3 мкм) на подложках анодного оксида алюминия. Были проведены *in situ* и *in operando* исследования межслоевого расстояния в ОГ в зависимости от парциального давления паров воды и перепада давления на мембране.

Было установлено, что для оксида графена наблюдается существенное возрастание межплоскостного расстояния от ~ 8 до ~ 11 Å при увеличении парциального давления паров воды, соответствующее изотерме абсорбции паров типа H_2 .

Полученные изотермы позволили оценить избыточную энергию капиллярной конденсации воды в нанощелях оксида графена в $\sim 0,6$ кДж/моль. В то же время в *in operando* экспериментах наблюдался существенный гистерезис межслоевого расстояния в оксиде графена, свидетельствующий об ограничении переноса воды через внешние слои ОГ со стороны пермеата. Было показано, что при высокой влажности высокая проницаемость мембран хорошо описывается в приближении течения сплошной среды в нанощелях с учетом величины лапласовского давления.

Для оценки количества воды в межслоевом пространстве оксида графена и подвижности молекул воды в нанощелях было выполнено моделирование структуры ОГ, интеркалированного водой, полуэмпирическим методом Хартри-Фока. Результаты моделирования позволили установить дискретное увеличение межслоевого расстояния с ростом количества адсорбированной воды, соответствующее послойному заполнению структуры ОГ/ H_2O , а также выявить существенное увеличение энергии активации

диффузии при межслоевом расстоянии, характерном для наличия единичного слоя молекул воды между нанослоями.

Таким образом, по данным *in situ* и *in operando* экспериментов, а также по результатам математического моделирования было установлено, что механизм транспорта паров воды в оксиде графена формируется межслоевым расстоянием, которое, в свою очередь, определяется влажностью сырьевого потока и пермеата. При малых межслоевых расстояниях наблюдается прыжковый механизм диффузии молекул воды между адсорбированными состояниями. Однако при увеличении количества адсорбированной воды происходит формирование нескольких слоев молекул воды в межслоевом пространстве и переход к механизму течения квазисплошной среды под действием сил капиллярного давления. Это определяет эффективность использования мембран на основе оксида графена исключительно в приложениях с высоким парциальным давлением паров воды в пермеатном потоке (>50%). Снижение парциального давления в пермеате будет приводить к существенному снижению проницаемости мембраны по парам воды и соответствующей потере эффективности контактора.

Барьерные мембраны на основе оксида графена, нанесенного на полые полипропиленовые волокна протестированы в процессе опреснения рассолов с помощью первапорации. Показано, что использование тонкого селективного слоя оксида графена позволяет избежать проникновения жидкой фазы в пористую структуру полого волокна - и, таким образом, предотвратить блокировку пор отложениями солей, что позволяет в дальнейшем использовать композитные мембраны ОГ/ПП в задачах опреснения морской воды и водоподготовки.

В заключительной части представлена технико-экономическая оценка мембранных контакторов для систем очистки и осушения газов. Проведено сопоставление способов очистки и осушения газа с использованием нанопористых мембранных контакторов и существующих мембранных и традиционных схем подготовки. Показано, что несмотря на существенное увеличение эффективности (скорости массопереноса) мембранных контакторных устройств, снижение массогабаритных характеристик не всегда является ключевым для достижения максимальной экономической эффективности.

Увеличение операционных затрат (за счет стоимости мембраны) и нецелесообразность применения при высоких концентрациях кислых газов (более 5%) можно отнести к основным недостаткам метода пертракции. Существенным преимуществом мембранных контакторов является возможность установки систем очистки газа до компрессорных установок, что во многом определяет их технологическую

применимость для газов низкого давления. Компактность установок для безрегенераторных систем (с щелочным абсорбентом) также может являться ключевым достоинством технологии, особенно для слабозагрязненных газов.

Показано, что наряду с технологическими преимуществами, предложенные способы подготовки газа на основе нанопористых мембранных контакторов способны обеспечить и экономические преимущества (увеличение NPV на 10-30%), что делает целесообразным внедрение данных подходов в промышленной подготовке газов. Работоспособность технологии очистки попутных нефтяных газов от сероводорода и углекислого газа подтверждена при проведении промышленных испытаний (Нефтегорский газоперерабатывающий завод ПАО «НК «Роснефть», 08.2017; УПСВ Гаршино ПАО «Оренбургнефть», 10-11.2019; 10-12.2022).

В **заключении** диссертационной работы автор подвел итоги выполненных исследований и сформулировал выводы.

Апробация работы прошла на 9 международных и всероссийских конференциях. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных изданиях, 9 из которых опубликованы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Зарегистрировано 5 патентов на изобретения.

Основные замечания по диссертации:

1. Большое количество полученных экспериментальных данных в большинстве случаев не аппроксимировались какими бы то ни было статистическими или аналитическими модельными зависимостями (рис. 4.4, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9б, 4.13, 4.14, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.31, 4.34). Как следствие, ряд утверждений об идентификации координат критических точек и/или оптимизации тех или иных рассмотренных процессов носит условный характер. Например, в параграфе 4.3.1 (стр.126) написано, что «На зависимости поглощения CO_2 появляются две характерные точки перегиба при уровнях насыщения абсорбента ~ 0.5 (соответствует Na_2CO_3) и ~ 1 (соответствует NaHCO_3). В случае H_2S возникает только одна точка перегиба при степени насыщения абсорбента ~ 1 (NaHS), что свидетельствует об абсорбции кислых компонентов в виде различных ионных форм».

- Во-первых, вторая точка перегиба зависимости эффективности извлечения углекислого газа от степени насыщения абсорбента наблюдается (а) при $f \approx 0,8$;

- во-вторых, при использовании различных аппроксимирующих функций точки перегиба будут наблюдаться (а,б) при различных значениях независимой переменной (в точке

перегиба производная второго порядка аппроксимирующей функции должна обращаться в ноль); следовательно, необходимо уточнять, какая именно математическая модель была использована при аппроксимации экспериментальных данных;

- в-третьих, из текста работы не ясно, связаны ли представленные теоретические кривые на (в,г)с решением системы дифференциальных уравнений (4.3) и каков уровень качества аппроксимации ими соответствующих экспериментальных данных.

2. На рисунке 4.41 (стр.159) представлены результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для исходной и модифицированной полипропиленовых мембран. Не ясно, из каких соображений соискатель выбрал столь разные диапазоны значений независимой переменной (энергии связи) для демонстрации эффективности процесса модификации поверхности полимерной матрицы.

3. На рисунке 4.42 представлены результаты ИК-спектроскопии фторированного полипропилена. В известных работах по фторированию полимеров наличие прореагировавшего фтора (C-F связи) идентифицируются, как правило, в области $1000-1300\text{ см}^{-1}$; при этом при $\sim 3000\text{ см}^{-1}$ наблюдаются спектральные линии, которые обычно идентифицируются как характеризующие связи между атомами углерода. Таким образом, из рис.4.42 можно сделать вывод о наличии структурных перестроек в модифицированном материале, но доказательством присоединения фтора к углероду представленный спектр, видимо, не является.

4. Некоторые ошибки в тексте.

В формулах 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 4.1 (вероятно, при трансформации docx-файла в pdf) некорректно распознались индексы «*i*» при переменных.

На стр.46 представлены фразы «Соотношение проницаемостей воды и других растворителей достигает 104» и «Авторам удалось достичь проницаемости по отношению к парам воды до $81.5\text{ м}^3/(\text{м}^2\text{атм ч})$, при селективности в паре $\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ более 104 (влажность сырьевой смеси 80%)», в которых, вероятнее всего, «104» следует читать как $10^4 (=10000)$

На стр.61, вероятно, требуется убрать символ % из описания единицы измерения площади мембраны:

В расшифровке обозначений к формуле 4.2 должна быть убрана искажающая смысл запятая.

Сделанные замечания и обнаруженные неточности не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Методики выполнения измерений, описания испытательных стендов и приборов для проведения экспериментов, а также

объекты исследований и полученные научные результаты достаточно подробно описаны в публикациях соискателя.

Сравнительный анализ диссертации, докладов, патентов и научных статей соискателя показывает, что основные результаты, составляющие научную новизну и практическую значимость диссертационной работы, сформулированные соискателем, опубликованы в статьях, ссылки на которые приведены в автореферате и в диссертации.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

В тексте диссертации не обнаружен заимствованный материал без ссылки на автора или источник заимствования.

Диссертация Пояркова Андрея Александровича на тему «Интенсификация процессов массопереноса с использованием мембранных контакторов на основе нанопористых мембран» по 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 № 103 ОД, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научным специальностям 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки) и 2.6.17. Материаловедение (технические науки)

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).

Работа полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (п.1. Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на

функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной). п.4. Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физикомеханическими, биомедицинскими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой. п.8. Разработка и компьютерная реализация математических моделей физикохимических, гидродинамических, тепловых, хемореологических, фазовых и деформационных превращений при производстве, обработке, переработке и эксплуатации различных металлических, неметаллических и композиционных материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов, а также разработка специализированного оборудования. п.12. Разработка физико-химических процессов получения функциональных покрытий на основе новых металлических, неметаллических и композиционных материалов. Установление закономерностей влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и других факторов на свойства функциональных покрытий).

Назаров Виктор Геннадьевич

доктор технических наук, профессор

профессор кафедры «Инновационные материалы притмедиаиндустрии»

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский Политех)

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

г. Москва, ул. Большая Семеновская, д.38

тел.: 8 (495) 223-05-23, доб. 4089

электронная почта 110505n@gmail.com

Подпись официального оппонента Назарова Виктора Геннадьевича удостоверяю.

ДЕЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ПОГОРЕЛОВА А.

