

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан механико-математического
факультета
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова,
[redacted], профессор
Цафаревич

варя 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ

на диссертационную работу **Казанина Ивана Викторовича**
«Экспериментальное исследование избирательной проницаемости
полых микросферических частиц и сорбента на их основе по
отношению к гелию», представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 –
механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Казанина И. В. посвящена экспериментальному исследованию параметров гелиевой проницаемости различных типов полых микросферических частиц и возможности их применения в качестве гелий проницаемого компонента в композитном сорбенте.

Тематика работы связана с задачей выделения гелия из природного газа и направлена на повышение эффективности технологии извлечения гелия, разработку новых не криогенных способов выделения гелия, которые представляются более выгодными с точки зрения снижения стоимости и повышения эффективности процесса. Одним из возможных вариантов повышения эффективности процесса выделения гелия из природного газа может быть мембранно-сорбционный метод выделения гелия, предложенный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, объединяющий в себе мембранную технологию и короткоцикловую адсорбцию. Одной из отличительных особенностей предлагаемого метода является использование полых микросферических частиц из силикатных материалов в качестве

мембранных элементов, стенка которых селективно проницаема для гелия и непроницаема для остальных компонентов природного газа.

Актуальность темы диссертационной работы Казанина И. В. обусловлена недостаточностью знаний и отсутствием исчерпывающего корректного представления о проницаемости материала стенки полых микросферических частиц по отношению к гелию с целью их дальнейшего применения в качестве селективно проницаемых наполнителей в композитных сорбентах.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые исследованы параметры гелиевой проницаемости синтетических полых микросферических частиц. Определены параметры удельной гелиевой проницаемости для различных типов полых микрочастиц, включая синтетические полые микрочастицы – микросферы и ценосферы. Впервые показана возможность использования полых микросферических частиц для создания бифункционального композитного сорбента. На основе синтетических микросфер МС-В-1Л и ценосфер НМ-Р-5А-0,16 в качестве наполнителя и псевдобемита в качестве связующего материала созданы образцы композитных сорбентов для извлечения гелия из гелийсодержащих смесей (природного газа) и выполнены исследования динамики процессов сорбции и десорбции гелия композитными сорбентами.

Практическая значимость работы заключается в комплексном изучении сорбционных свойств полых микросферических частиц и композитного сорбента на их основе. Результаты исследования могут быть непосредственно использованы при практической реализации мембранно-сорбционной технологии выделения гелия из природного газа. Создание эффективного сорбента и его применение в данной технологии позволит снизить энергетические и капитальные затраты при выделении гелия из природного газа. Конкурентоспособность предлагаемой технологии может быть особенно высокой в случае доставки природного газа конечному потребителю через газотранспортные системы. Применение исходных отечественных компонентов при производстве композитного сорбента делает независимой от внешнеэкономических факторов технологию извлечения гелия из природного газа.

Достоверность результатов диссертации обеспечена тем, что в работе используются традиционные и хорошо апробированные методы измерения давления и температуры. Демонстрируется повторяемость экспериментальных результатов. Важным свидетельством достоверности является представление результатов диссертационной работы на тематических научных конференциях и их публикация в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 79 наименований. Общий

объем диссертационной работы составляет 141 страницу, включая 63 иллюстрации, 13 таблиц и одно приложение.

Во введении автором достаточно подробно представлена актуальность тематики работы, обозначена её научная новизна и практическая значимость. Формулируются цели и задачи исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту. Дано краткое содержание работы.

Первая глава посвящена литературному обзору методов выделения гелия из природного газа. В обзоре рассматриваются как современные, получившие широкое распространение методы, так и возможные перспективные способы выделения гелия из природного газа. Автором подробно описывается криогенная технология выделения гелия из природного газа, физические основы и примеры практических схем реализации, основные достоинства и недостатки. Далее в главе детально рассматриваются мембранные и адсорбционные технологии разделения газовых смесей. Автором описывается современный опыт применения мембранных технологий в нефтегазовой отрасли для подготовки природного газа, очистке его от углекислого газа и водорода. Рассмотрены известные подходящие материалы для мембран при извлечении гелия из природного газа и их особенности, возможные конструкции мембранных блоков. Приводится подробное описание предложенной в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН мембранно-сорбционной технологии выделения гелия из природного газа с детальным описанием отличительных особенностей метода, достоинств и недостатков. В заключении главы делается вывод о перспективности проводимых исследований.

Вторая глава носит методический характер и посвящена описанию оборудования и экспериментальных установок, методики проведения экспериментов. Подробно описывается эволюция экспериментальных стендов в соответствии с возникавшими в ходе работы задачами исследований. Изложена методика представления и нормировки экспериментальных данных, методика расчета параметров гелиевой проницаемости исследуемых сорбентов, коэффициентов гелиевой проницаемости материала стенок микрочастиц. На основании материалов второй главы может быть сделан вывод о достоверности экспериментальных данных, которые представлены далее.

В третьей главе приводится описание полых микросферических частиц и данные экспериментального исследования их сорбционных характеристик. Следует обратить внимание на подробное сравнение исследуемых в работе различных типов микросферических частиц с точки зрения особенностей технологий их производства, химического и гранулометрического состава, строения поверхности оболочек микрочастиц. Приведены результаты экспериментов, полученные при различных начальных давлениях рабочего газа, получены кинетические кривые сорбции/десорбции гелия. Проведены эксперименты по исследованию

влияния температуры на гелиевую проницаемость исследуемых микросферических частиц. Поставлены модельные эксперименты по моделированию процесса обогащения гелийсодержащей смеси газов с помощью полых микросферических частиц.

В четвертой главе представлены результаты исследования сорбционных характеристик композитного сорбента на базе полых микросферических частиц, а именно микросфер МС-В-1Л и ценосфер НМ-Р-5А-0,16 НФ. В ходе экспериментального исследования гелиевой проницаемости данных сорбентов, получены кинетические кривые сорбции/десорбции при различных давлениях и температурах рабочего газа в адсорбере с сорбентом. Установлено, что композитный сорбент является проницаемым по отношению к гелию и непроницаемым для воздуха и метана. При этом для образцов сорбента на основе синтетических микросфер МС-В-1Л наблюдалось увеличение гелиевой проницаемости практически на два порядка по сравнению с исходными микросферами. На основании полученных результатов продемонстрирована принципиальная возможность применения полых микросферических частиц в качестве наполнителя композитного сорбента в мембранно-сорбционной технологии выделения гелия из природного газа.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Список литературы состоит из 79 публикаций.

Приложение посвящено оценке погрешностей, получаемых в ходе исследования экспериментальных данных, и определяемых на основании этих данных параметров.

Таким образом, представленная диссертация является законченной научной работой, а полученные результаты соответствуют поставленным в ней целям и задачам и носят как фундаментальный, так и прикладной характер. Тема диссертации соответствует обозначенной научной специальности. Материал изложен четко, ясно, главы логически связаны между собой и дают целостную картину исследуемого явления.

Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации.

Материалы диссертации могут быть использованы при практической реализации мембранно-сорбционной технологии выделения гелия из природного газа. Полученные результаты могут быть применены как в научных исследованиях, так и использованы при разработке новых экспериментальных стендов и новых технологий газоразделения. Экспериментальные данные по сорбционным параметрам сорбентов на основе полых микросферических частиц могут быть также использованы для верификации математических моделей процессов поглощения гелия данными типами сорбентов.

Результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию: докладывались на 11 российских и 9 международных конференциях,

опубликованы в 44 печатных работах, среди которых 5 работ в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Для исследуемой в работе узкой фракции микросфер МС-ВП-А9, в отличие от микросфер МС-В-1Л, не приведены параметры гранулометрического состава после процедуры просеивания. Тем более, что далее в работе геометрические параметры частиц используются при определении параметров газовой проницаемости.

2. Исходя из проведенных исследований гелиевой проницаемости различных типов полых микросферических частиц в 3 главе, наиболее перспективными синтетическими микросферами могут быть кремнеземные микросферы, с высоким коэффициентом гелиевой проницаемости или, возможно, микросферы МС-ВП-А9, обладающие высокой гидростатической прочностью. Поэтому, не совсем понятен дальнейший выбор в качестве гелий проницаемого компонента для композитного сорбента микросфер МС-В-1Л, имеющих заведомо более низкие характеристики.

3. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, стилистические погрешности, имеет место ряд погрешностей в оформлении, некоторое количество орфографических и пунктуационных ошибок.

Указанные недостатки не умаляют достоинства работы, отмеченные в отзыве.

Диссертация И.В. Казанина «Экспериментальное исследование избирательной проницаемости полых микросферических частиц и сорбента на их основе по отношению к гелию» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является завершённой научно-квалификационной работой, которая является цельным и законченным научным исследованием. Диссертация полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор диссертационной работы Казанин Иван Викторович безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры газовой и волновой динамики, протокол № 21 от 30 декабря 2019 г.

Зам. зав. кафедрой газовой и волновой динамики,
доктор физико-математических наук,
профессор

И.И. Смирнов

Профессор кафедры газовой и волновой динамики,
доктор физико-математических наук,
профессор

10.01.20

А.Б. Киселев

Сведения о ведущей организации по диссертации
Казанина Ивана Викторовича
"Экспериментальное исследование избирательной проницаемости полых микросферических частиц и сорбента на их основе по отношению к гелию" по специальности 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	МГУ имени М.В. Ломоносова
Ведомственная принадлежность организации	МГУ имени М.В. Ломоносова
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Механико-математический факультет, кафедра газовой и волновой динамики
Почтовый адрес организации:	МГУ имени М.В. Ломоносова, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия
Веб-сайт	https://www.msu.ru/
Телефон	+7(495)9393754
Адрес электронной почты	gvd@mech.math.msu.su

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Smirnov N.N., Kiselev A.B., Zakharov P.P.	Numerical simulation of high-speed collision of the ball and the spherical fluid-filled shell	Acta Astronautica. - 2019. Vol. 163. - P. 62-72	Статья, 2019
2	Smirnov N.N.	Experimental studies and supercomputer simulations aimed at ensuring safety of Space missions	Acta Astronautica. - September 2018. Vol. 150. - P. 1-5	Статья, 2018
3	Киселев А. Б., Мищенко А. В.	Использование упругопластических моделей для описания экспериментальных данных по откольному разрушению при плоском	Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. — 2015.	Статья, 2015

		соударении пластин	— № 6. — С. 29-36	
4	Киселев А. Б., Серёжкин А. А.	Особенности процесса соударения упругопластического цилиндра с недеформируемой преградой	Прикладная математика и механика. — 2015. — Т. 79, Вып. 4. — С. 571-583	Статья 2015
5	Smirnov N.N., Kiselev A.B., Smirnova M.N., Nikitin V.F.	Space traffic hazards mitigation strategies from orbital debris mitigation strategies	Acta Astronautica. — 2015. — Vol. 109, April-May 2015. — P. 144-152	Статья 2015

Декан механико-математического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
член-корреспондент РАН, профессор

аревич

Сведения о утвердившем и подписавшем отзыв

Фамилия имя отчество: Шафаревич Андрей Игоревич
Ученая степень: доктор физико-математических наук
Ученое звание: член-корреспондент РАН, профессор
Должность: декан механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
Место работы (основное): механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Адрес: 19991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, д. 1, Главное здание, механико-математический факультет
e-mail: office@mech.math.msu.su
телефон: 7(495)939-12-44

Информация о сотрудниках, подписавших отзыв:
Фамилия имя отчество: Смирнов Николай Николаевич
Ученая степень: доктор физико-математических наук
Ученое звание: профессор
Должность: заместитель заведующего кафедрой газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор
Подразделение: кафедра газовой и волновой динамики
Место работы (основное): механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Адрес: 19991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, д. 1, Главное здание, механико-математический факультет
e-mail: ebifsun1@mech.math.msu.su
телефон: 7(495)939-37-54

Фамилия имя отчество: Киселев Алексей Борисович
Ученая степень: доктор физико-математических наук
Ученое звание: профессор
Должность: профессор кафедры газовой и волновой динамик механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
Подразделение: кафедра газовой и волновой динамики
Место работы (основное): механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Адрес: 19991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, д. 1, Главное здание, механико-математический факультет
e-mail: akis2006@yandex.ru
телефон: 7(495)939-37-54