

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Верещагина Антона Сергеевича

**«Физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей»**,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

### **Актуальность темы диссертации.**

Процессы разделения и очистки газов, в том числе гелия, водорода и неона, играют важную роль в современной технике. Например, гелий получил широкое применение в промышленности, медицине, космической технике и научных исследованиях. Однако производство гелия сдерживается существующими технологиями его получения (криогенной, адсорбционной, мембранной) ввиду их энергозатратности и невысокой рентабельности.

Основным способом получения инертных газов в промышленных масштабах является криогенный метод, основанный на последовательной низкотемпературной конденсации сопутствующих компонент смеси. Криогенная технология требует большого количества наукоемкого оборудования и затрат энергии, что обуславливает высокую себестоимость продукционного газа. На данный момент неизвестно ни одного адсорбента, удерживающего заметное количество гелия, для использования в адсорбционном процессе выделения гелия из газовой смеси.

С другой стороны, альтернативой традиционным технологиям получения этих газов (гелия, водорода, неона) является мембранное газоразделение, преимуществами которого будет высокая производительность, низкая энергоёмкость, экологическая безопасность, простота использования. Перспективными материалами для создания высокоселективных мембран являются стеклокристаллические композиты, в качестве которых могут быть использованы микросферы или алюмосиликатные микросферы энергетических зол – ценосферы, образующиеся при промышленном пылевидном сжигании угля в ТЭС. Существующие материалы коммерческих мембран не обладают достаточной селективностью для разделения смесей. Стеклокристаллические композиты перспективны в качестве мембранных элементов для глубокой очистки газов, но их газоразделительные свойства в литературе практически отсутствуют. Мембранно-сорбционный метод выделения гелия из газовой смеси, разработанный и апробированный в ИТПМ СО РАН, основан на высокой селективности по отношению к гелию полых силикатных микросфер, а также композитного пористого сорбента на их основе. Вследствие этого такие частицы могут использоваться как микробаллоны, улавливающие гелий из смеси и удерживающие его в течение заданного времени.

Целью работы является создание теоретических основ эффективного мембранно-сорбционного метода выделения гелия из газовых смесей с помощью микросфер и основанных на них сорбентов.

## **Новизна и достоверность основных выводов и результатов, полученных и сформулированных в диссертационной работе**

Автором разработана математическая модель поглощения гелия сорбентом, состоящим из полых сферических частиц в условиях дисперсионного распределения по размерам и по приведённым коэффициентам проницаемости, а также получено аналитическое решение задачи о сорбции гелия микросферами и основанными на них сорбентами. Полученная модель с приемлемой точностью описывает экспериментальные данные по сорбции гелия микросферами и сорбентами.

Впервые в рамках механики многофазных сред разработана математическая модель течения смеси газов, включая гелий и пары воды, в слое покоящегося композитного сорбента, созданного на основе микросфер и пористой матрицы поглотителя влаги из оксида алюминия, для моделирования процесса выделения гелия из газовой смеси методом короткоциклового безнагревной адсорбции (КЦА). Проведено моделирование фазы обогащения в методе КЦА с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, которое показало возможность кратного увеличения концентрации гелия в воздушно-гелиевой смеси при его высокой степени извлечения.

На основании полученных моделей сорбции разработан алгоритм, описывающий массоперенос компонент газовой смеси в виртуальной копии (цифровом двойнике) крупномасштабной установки, разрабатываемой в ИТПМ СО РАН для моделирования процесса выделения гелия на месторождении или заводе по переработке природного газа. Разработан регламент мембранно-сорбционного метода выделения гелия из природного газа, и проведено численное моделирование, показавшее эффективность мембранно-сорбционного метода для процесса выделения гелия из природного газа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сравнением с экспериментальными данными и использованием хорошо зарекомендовавших себя методов исследования. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, и докладывались на всероссийских и международных конференциях. Исследования по теме диссертации были поддержаны 9 грантами различного уровня от грантов Новосибирской области до грантов Президента Российской Федерации. Работа по теме гелиевой проницаемости микросфер в 2012 году удостоена премии Сибирского отделения РАН имени академика С.А. Христиановича.

Результаты исследований опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, в 14 статьях в периодических научных журналах, индексируемых в зарубежных и российских базах данных. У автора имеется два патента на изобретение (в соавторстве) и зарегистрирована программа для ЭВМ.

## **Научная и практическая ценность диссертационной работы**

Месторождения газа в Восточной Сибири располагают значительными гелиеносными ресурсами углеводородов и являются идеальной базой для создания газоперерабатывающего, гелиевого и газохимического кластера для получения продукции с высокой добавленной стоимостью и создания необходимых и достаточных условий для динамичного экономического и социального развития территорий Сибири и Дальнего Востока. Подготовленные к промышленному освоению запасы природного газа

Ковыктинского и Чаяндинского месторождений являются крупными и классифицируются как богатые залежи по гелию. Прогнозные оценки освоения этих и других месторождений показывают, что Россия в ближайшем будущем может стать одним из крупнейших производителей и поставщиков гелия на внутренний и мировой рынок и удовлетворить потребности стран Юго-Восточной Азии и Тихоокеанского региона в природном газе.

Подготовка и комплексная переработка гелиеносного природного газа с целью выделения гелия, других ценных компонентов и последующей доставки природного газа по газотранспортным сетям от месторождений к потребителям является актуальной научной и технологической задачей. Решение этой задачи и строительство газотранспортной системы «Сила Сибири», объединяющей Иркутский и Якутский центры газодобычи, станет в итоге важным шагом в создании единой системы газоснабжения России.

Полученные автором диссертации результаты могут быть использованы для решения этих задач.

### **Оценка содержания диссертации в целом и замечания к оформлению диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 185 страниц, включая 66 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 139 наименований.

Во *введении* обосновывается актуальность проблемы выделения гелия из природного газа, проводится описание нового мембранно-сорбционного метода выделения гелия из природного газа, основанного на высокой селективной проницаемости для гелия полых стеклянных микросфер; указываются его основные преимущества по сравнению с известными способами выделения гелия из природного газа; формулируются цели исследования, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость.

*Первая глава* посвящена обзору основных методов выделения гелия из природного газа (криогенного, мембранного и сорбционного), описанию основных принципов, заложенных в основу мембранно-сорбционного метода, а также указанию его места среди остальных методов (обосновываются его основные преимущества и указываются недостатки).

*Вторая глава* посвящена исследованию и обобщению математических моделей поглощения гелия микросферами и композитным сорбентом в стационарных условиях. С использованием уравнения диффузии в сферическом квазистационарном приближении разработана математическая модель поглощения гелия сорбентом, состоящим из полых сферических частиц в условиях дисперсионного распределения по размерам и по приведенным коэффициентам проницаемости, представляющая собой уравнение Вольтерры второго рода. С использованием временных сорбционных зависимостей для микросфер МС-ВП-А9, МС-В-1Л и композитного сорбента показано, что в комплексе с результатами других работ полученное решение позволяет описать процесс поглощения гелия выбранными группами микросфер и выполнить их качественный и количественный анализ.

*Третья глава* посвящена моделированию нестационарных процессов, реализующихся в адсорберах и сорбционных колоннах на основе классических подходов механики многофазных сред. Приводится описание двух физико-математических моделей: 1) течения микросфер и газовой смеси с учётом поглощения гелия микросферами и 2) течения парогазовой смеси через покоящийся слой из содержащего микросферы бифункционального композитного сорбента, осушающего газовую смесь и улавливающего гелий. Основную практическую значимость представляет вторая модель, исследованию которой уделено больше места. Для неё получены соотношения на характеристиках и показано, что она имеет гиперболический тип. На основании линеаризации уравнений движения разработана численная модель одномерного течения воздушно-гелиевой смеси через адсорбер, заполненный гранулированным сорбентом с учётом диффузии воздуха и гелия внутрь цилиндрических гранул и удержания гелия микросферами. Проведена валидация математической модели фильтрации газа через пористую среду и распространения волны давления, образованной пришедшей ударной волной, по газовой среде. Получено качественное и количественное совпадение экспериментальных и расчётных данных. Проведено моделирование фазы обогащения в методе КЦА с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, которое показало возможность увеличения концентрации гелия в воздушно-гелиевой смеси практически в два раза (с 0.7 до 1.3 % по массе) при степени извлечения гелия 90.4 %.

В *четвертой главе* приведено описание цифрового двойника установки по выделению гелия из природного газа и результатов моделирования, проведённых по регламенту мембранно-сорбционного метода. Показана возможность извлечения 70 % по массе гелия с концентрацией 75 % (об.) из смеси при давлении 50 атм с концентрацией гелия 0.344 % (об.).

Выскажем некоторые вопросы по представленному исследованию.

1. Принципиально в моделях заложено, что в микросферы проходит только гелий. Отмечалось ли в экспериментах прохождение других одноатомных газов?

2. Возможна ли оптимизация предложенной в главе 4 схемы выделения гелия с целью ускорения выхода и получения более чистого продукционного газа?

3. В работе перепутана терминология этапов верификации численных алгоритмов и валидации математических моделей.

Высказанные замечания не снижают ценности диссертационной работы, представляющей собой законченное научное исследование. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам диссертации, опубликованные работы достаточно полно отражают её основное содержание.

Материал, представленный в диссертации, изложен в доступной и ясной форме, структура работы выдержана по всему тексту. Исследование выполнено на хорошем теоретическом уровне. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных методов математического моделирования.

По объёму и качеству выполненных исследований, актуальности поставленных задач, новизне, достоверности и научной обоснованности полученных результатов и

выводов представленная работа полностью соответствует критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени доктора наук, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

Верещагин Антон Сергеевич достиг поставленной цели – провёл физико-математическое обоснование нового перспективного мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей, который можно использовать для процессов газоразделения с целью подготовки и транспортировки природного газа. Считаю, что Верещагин А. С. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук

(специальность 01.01.07 – Вычислительная математика)

директор Института вычислительного моделирования Сибирского отделения

Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

/ Шайдуров Владимир Викторович

(подпись)

« 03 » мая 2023 г.

**Контактные данные:**

Тел.: 8 (391) 243-27-56; E-mail: shaidurov04@mail.ru.

Адрес места работы: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44,

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»; обособленное подразделение – Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН)

Подпись Шайдурова В. В. заверяю.

Ученый секретарь ФИЦ КНЦ СО

к.ф.-м.н.

П. Г. Шкуряев

Председателю  
диссертационного совета  
24.1.125.01 (Д 003035.02)  
академику РАН В. М. Фомину

### ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОПОНЕНТА

Я, Шайдуrow Владимир Викторович, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации Верещагина Антона Сергеевича на тему: «Физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей» на соискание ученой степени *доктора физико-математических наук* по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю следующие сведения.

Ученая степень, отрасли науки	д-р физ.-мат. наук
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.01.07 – вычислительная математика
Ученое звание	профессор
Академическое звание	член-корреспондент РАН
Телефон	8 (391) 243–27–56
E-mail	shaidurov04@mail.ru
Должность	директор обособленного подразделения – ИВМ СО РАН
Подразделение организации	обособленное подразделение – Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН)
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Адрес служебный: почтовый индекс, город, улица, дом	660036, г. Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44, ИВМ СО РАН
Web-сайт организации	<a href="https://ksc.krasn.ru/">https://ksc.krasn.ru/</a>
Телефон организации	+7 (391) 243-45-12
E-mail организации	fic@ksc.krasn.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 50 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1.	Shaidurov V.V., Vyatkin A.V., Kuchunova E.V.	Semi-Lagrangian Difference Approximations with Different Stability Requirements // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. Vol. 33. № 2. P. 123-135.
2.	Shaydurov V.V., Shchepanovskaya G.I., Yakubovich M.V.	Semi-Lagrangian Approximation of Conservation Laws in the Flow Around a Wedge // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. Vol. 39. № 7. P. 936-948.
3.	Gileva L., Shaydurov V.	Bicubic Hermite Elements in a Domain with the Curved Boundary // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. Vol. 39. № 7. P. 893-903.
4.	Shaydurov V., Kornienko V., Zhang S.	The Euler–Lagrange approximation of the mean field game for the planning problem // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 41. № 12. P. 2702-2713.
5.	Shaydurov V., Zhang S., Karepova E.	The finite difference approximation preserving conjugate properties of the mean-field game equations // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. Vol. 40. № 7. P. 513-524.
6.	Kornienko V., Shaydurov V.	Numerical Solution of Mean Field Problem with Limited Management Resource // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. Vol. 42. № 7. P. 1686-1696.
7.	Vyatkin A.V., Kuchunova E.V., Shaydurov V.V.	Semi-Lagrangian Difference Approximations with Different Stability Requirements // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2018. Vol. 33. № 2. P. 123-135.
8.	Корниенко В.С., Шайдулов В.В., Кареева Е.Д.	Конечно-разностный аналог задачи равновесия “среднего поля” // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 31-44.
9.	Гилева Л.В., Шайдулов В.В., Кареева Е.Д.	Теория и применение эрмитовых конечных элементов. – 2021. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета. 196 с.
10.	Vyatkin A.V., Shaydurov V.V., Kuchunova E.V.	Two finite volume schemes for advection equation // Lecture Notes in Computer Science and Engineering. 2022. Vol. 141. P. 545-561.
11.	Lapin A.V., Shaidurov V.V.	A Diffusion-Convection Problem with a Fractional Derivative along the Trajectory of Motion // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2021. Vol. 36. № 3. P. 157-163.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК.

Даю согласие на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

23.01.2022

(В.В.Шайдулов)