

ОТЗЫВ

официального оппонента Павленко Александра Николаевича на диссертационную работу

Верещагина Антона Сергеевича

«ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

МЕМБРАННО-СОРБЦИОННОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ

ГЕЛИЙ-СОДЕРЖАЩИХ СМЕСЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность темы диссертационной работы

Данное диссертационное исследование, направленное на обоснование и развитие принципиально новой мембранно-сорбционной технологии, которая может найти успешное применение для извлечения гелия из природного газа газоконденсатных месторождений Восточной Сибири. Эта технология, подтвержденная в патентах РФ, основана на экспериментально обоснованной способности полых проницаемых сферических частиц (микросфер) избирательно поглощать гелий из гелиеносных газов, а затем выделять его и накапливать в виде концентрата с высоким содержанием гелия. Этот метод может быть конкурентоспособной альтернативой криогенным и мембранным технологиям в силу простоты конструкции оборудования, меньших энергетических и капитальных затрат, а также благодаря высокой селективности микросфер по отношению к газам гелий/метан, гелий/азот, гелий/неон и др, цикличности разнонаправленных процессов сорбции и десорбции, предотвращающей поверхностное загрязнение полых проницаемых сферических частиц (микросфер).

Научные и научно-практические результаты, полученные в рамках данной диссертационной работы, являются важным шагом на пути получения новых знаний в разделах механики сплошных сред, связанных с физико-математическими моделями механики многофазных и пористых сред.

Научная актуальность работы заключается в том, что при использовании общих подходов механики многофазных сред и моделей непористых мембран диссертанту удалось описать процесс поглощения гелия полыми стеклянными микросферами и композитным сорбентом на их основе в стационарных и нестационарных условиях, а также создать цифрового двойника крупномасштабной установки, реализующей мембранно-сорбционный метод.

Несомненно, результаты диссертационной работы Верещагина А.С. позволят моделировать процессы обогащения/разделения гелий-содержащих газовых смесей с помощью полых стеклянных микросфер и композитного сорбента на его основе, тем самым создать новый эффективный подход для выделения гелия из природного газа.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы по следующим областям исследований:

– течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии);

– течение жидкостей и газов в пористых средах;

По формуле специальности: научная дисциплина, задачей которой является построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля технологических процессов, включающих движения текучих сред, а также разработка и совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиции энерго- и ресурсосбережения.

Научная новизна

С точки зрения оппонента наиболее важными и принципиально новыми научными результатами являются следующие:

- впервые разработанная математическая модель поглощения гелия сорбентом, состоящим из полых сферических частиц в условиях дисперсионного распределения по приведённым коэффициентам проницаемости (включающая распределение как по размерам, так и по коэффициентам проницаемости) и аналитическое решение задачи о сорбции гелия микросферами и сорбентом на основе микросфер;
- приведённые коэффициенты сорбции для различных групп исследуемых микросфер и сорбентов на основе микросфер;
- впервые разработанная в рамках механики многофазных сред 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);
- результаты моделирования фазы обогащения в методе КЦА с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, которые показали

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. Получены результаты моделирования фазы обогащения в методе КЦА с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, показавшие кратное увеличение концентрации гелия в воздушно-гелиевой на выходе из адсорбера

Разработан цифровой двойник крупномасштабной опытно-промышленной установки и получены результаты моделирования в соответствии с регламентом мембранно-сорбционного метода.

Запатентовано научно – система и способ разделения газовой смеси и способ разделения многокомпонентной газовой смеси.

Получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ на цифровую модель мембранно-сорбционной установки для извлечения гелия из природного газа.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит (всего 185 стр., включая 66 рисунков и 10 таблиц) из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (139 наименований) и трёх приложений.

Во Введении сформулированы актуальность, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы и достоверность исследований, личное участие автора.

Цель и задачи исследования сформулированы конкретно и достаточно подробно. Охарактеризована научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Указано личное участие автора период выполнения исследований. Приведён перечень конференций, симпозиумов и семинаров, где докладывались отдельные разделы диссертации, грантов, в рамках которых проводились исследования и перечень наград за цикл работ по этой тематике.

В первой главе представлен обзор основных методов выделения гелия из газовых смесей (криогенного, мембранного, сорбционного), а также основных принципов, заложенных в мембранно-сорбционный метод и указано его место среди них. Представлены основные подходы для моделирования многофазных сред, а также приведено описание микросфер, ценосфер и сорбента на их основе, их состава и возможных сфер применения.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований и моделирования явления поглощения гелия микросферами с учётом их дисперсионного распределения по размерам и коэффициентам проницаемости в стационарных условиях.

В результате выполненного математического моделирования предложена методология разделения исследуемой засыпки микросфер на группы по характерной проницаемости и получены количественные значения параметров этих групп для найтрийборсиликатных, алюмосиликатных микросфер и композитного сорбента на их основе.

В третьей главе приводится вывод двух физико-математических моделей:

- 1) течения микросфер и газовой смеси с учётом поглощения гелия микросферами и
- 2) течения парогазовой смеси через покоящийся слой из бифункционального композитного сорбента, содержащего микросферы, осушающего газовую смесь и улавливающего гелий. Обе модели исследуются на характеристики. Последняя верифицируется на ряде экспериментальных данных и используется для моделирования фазы обогащения газовой смеси гелием в методе коротко-цикловой безнагревной адсорбции, где в качестве сорбента используется композитный сорбент на основе микросфер. 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. В результате выполненного математического моделирования фазы обогащения метода коротко-цикловой безнагревной адсорбции показана принципиальная возможность получения обогащенного гелием газа.

В четвёртой главе приведено описание цифрового двойника установки по выделению гелия из метан-гелиевой газовой смеси и результатов моделирования, проведённых по регламенту мембранно-сорбционного метода, показавшие возможность выделения концентрата с содержанием гелия до 75 % (об.) при степени извлечения приблизительно равной 75 % с помощью бифункционального сорбента на основе микросфер.

В конце работы в Заключении приводятся четко сформулированные общие выводы, достаточно убедительно обоснованные в диссертационной работе.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, полученных результатов обеспечивается сравнением с экспериментальными данными и применением хорошо

зарекомендовавших себя методов исследования. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Все научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы основываются на проверенных и тщательно проанализированных результатах и являются обоснованными.

Рекомендации по использованию научно-технических результатов и выводов диссертации. Результаты данной работы могут найти широкое применение для проектирования и модернизации установок, реализующих мембранно-сорбционный метод для выделения гелия из гелий-содержащих смесей на заводах по переработке природного газа или при подготовке газа к транспорту.

Разработанные алгоритмы позволяют количественно описать временные зависимости поглощения гелия микросферами, а также выполнить расчет основных циклов в методе коротко-цикловой безнагревной адсорбции, где в качестве сорбента используются микросферы и сорбенты на их основе.

Результаты исследований могут быть использованы на заводах по переработке природного газа (Амурском, Оренбургском ГПЗ) или при подготовке природного газа к транспортировке (с Чаяндинского, Ковыктинского месторождений, месторождений ПАО «Татнефть» (г. Альметьевск), др.).

Результаты диссертации можно рекомендовать для использования: в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ВНИИ холодильного машиностроения, на предприятиях химической, нефтегазовой промышленности, криогенной промышленности и других предприятиях энергетического профиля (ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ», ПАО «Криогенмаш», Российская научно-производственная компания (НПК) «Грасис», АО «НТК Криогенная техника» и др.), а также в ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет", ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), ФГБУН Институт теплофизики им. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), ФГБУН Институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН), Пензенский государственный технологический университет (ПензГТУ).

Результаты проведенных исследований также целесообразно рекомендовать для студентов вузов и аспирантов в учебном процессе, специализирующихся в области тепломассообмена в многофазных системах и пористых средах, разработки аппаратов

химической промышленности по очистке, разделению смесей газов, получению продуктов высокой чистоты.

По содержанию работы имеется ряд замечаний, которые возникли у оппонента в силу некоторых недостатков работы:

1. По полученным коэффициентам проницаемости для микросфер МС-В-1Л и композитного сорбента на их основе видно, что характерное время сорбции для композитного сорбента существенно меньше. С чем это может быть связано?

2. По мнению оппонента, в третьей главе было бы целесообразно провести расчеты для полного моделирования процесса выделения гелия в рамках коротко-цикловой безнагревной адсорбции (КЦА) с учётом всех стадий этой технологии (стадии цикла отбора целевого газа и регенерации) для получения более точных оценок по степени обогащения и степени выделения гелия из смеси.

3. Необходимо прокомментировать сложный немонотонный характер изменения зависимости массовой концентрации гелия на выходе из адсорбера от времени при увеличении начальной температуры от 75 град. С до 120 град. С, представленный на рис. 3.6а.

4. Целесообразно отметить, какие преимущества и недостатки у композитного сорбента перед микросферами, какие ограничения есть у композитного сорбента по емкости для гелия и как их можно преодолеть?

5. При исследовании математической модели прохождения смеси газов через пористый слой из композитного сорбента на основе микросфер показано лишь существование вещественных характеристик, но не указано какого типа возмущения распространяются вдоль них.

6. В тексте диссертационной работы имеется ряд грамматических ошибок (опечатки, отсутствие запятых, двоеточий, кавычек, ошибки в окончаниях слов, отсутствие или наличие лишних пробелов между словами: см.: стр. 29, стр. 32-34, стр. 81, стр. 87, стр. 91, стр. 124, стр. 125, стр. 127, стр. 146, стр. 149, стр. 150, стр. 178).

Однако число и содержание данных замечаний не критичны для восприятия и анализа работы, для высокой оценки научной и практической значимости полученных диссертантом результатов. Материал диссертации изложен достаточно последовательно и развернуто ясным для понимания языком без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован качественно оформленными рисунками, фотографиями, приложенными таблицами

Заключение

В результате рассмотрения диссертационной работы Верещагина А.С. можно сделать следующие выводы. В диссертации рассмотрен и теоретически обоснован новый мембранно-сорбционный метод выделения гелия из гелий-содержащих смесей с помощью полых стеклянных микросфер и композитного сорбента на их основе.

Диссертация Верещагина А.С. является **завершенной научно-квалификационной работой**, в которой на основании выполненных автором исследований **разработаны**

теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики многофазных систем и пористых сред, связанной с гидродинамикой и массообменом при течении смесей газов в среде с мембранно-сорбционным материалом, и решена крупная научно-техническая проблема по физико-математическому обоснованию разработки мембранно-сорбционного метода извлечения гелия из газовых смесей. Основные результаты диссертационной работы широко и достаточно полно опубликованы в ведущих рецензируемых журналах по механике сплошных сред, механике многофазных сред.

Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации. Диссертация Верещагина Антона Сергеевича полностью соответствует всем требованиям ВАК РФ (пункт 9 «Положения о присуждении ученых степеней»).

Считаю, что её автор, несомненно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

доктор физико-математических наук
член-корр. РАН, зав. научно-исследовательской лабораторией низкотемпературной теплофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
(ИТ СО РАН).

Специальность докторской диссертации: 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.
E-mail: pavl@itp.nsc.ru
Моб. тел.: 8-913-920-1248.
тел. раб.: 8(383) 328-43-87.

Павленко
Александр Николаевич

Лично собственноручную подпись
Павленко А.Н.
УДОСТОВЕРЯЮЩАЯ ПОДПИСЬ

«14» апреля 2023 г.

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

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Павленко Александр Николаевич, 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:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника
Ученое звание	Старший научный сотрудник
Академическое звание	Член-корр. РАН (секция «механика»)
Тел:	+7 (383) 3284387, +7-913-920-1248
E-mail:	pavl@itp.nsc.ru
Должность	Заведующий научно-исследовательской лабораторией низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН.
Подразделение организации	Научно-исследовательская лаборатория низкотемпературной теплофизики (№ 1.3).
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.
Web-сайт организации.	https://www.itp.nsc.ru/
Телефон организации.	8 (383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.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.	Pavlenko A.N. , Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Meski G.A., Houghton P.A.	Overview of methods to control the liquid distribution in distillation columns with structured packing: improving separation efficiency // Renewable & Sustainable Energy Reviews , 2020. – Vol. 132, No. 110092 -1–110092 -11. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110092. Q1. IF – 14.34.
2.	Pavlenko A.N. , Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Nazarov A.D., Meski G., Houghton P.	Separation efficiency of mixtures by distillation using structured noncircular packings // Chemical Engineering and Processing . 2018. T. 133. С. 211-220.
3.	Surtaev A., Kuznetsov D., Serdyukov V., Pavlenko A. , Kalita V., Komlev D., Ivannikov A., Radyuk A.	Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling // Applied Thermal Engineering . 2018. Vol. 133. P. 532–542. Q1. IF – 3.356.
4.	Павленко А.Н. , Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Калита В.И., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Радюк А.А.	Экспериментальное исследование повторного смачивания перегретой пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием стекающей пленкой жидкости // Теплофизика высоких температур . 2018. Т. 56, № 3. С. 424–430. Q2. IF – 1.512.
5.	Pavlenko A.N. , Kuznetsov D.V., Surtaev A.S.	Efficiency of mixture separation in distillation columns with various structured packings under conditions of dynamically controlled irrigation // Chemical Engineering Transactions . 2018. Vol. 69. P. 25–30.
6.	Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. , Zhukov V.E., Nazarov A.D., Meski G., Houghton P.	Mixture separation in distillation column with semi-cylindrical structured packing // Journal of Physics: Conference Series . 2018. Vol. 1105, No. 012064. 5 P.
7.	Pavlenko A.N. , Zhukov V.E., Pecherkin N.I., Nazarov A.D., Slesareva E.Yu., Li X., Sui H., Li H., Gao X.	Efficiency of mixture separation in a large-scale model of distillation column at periodic packing irrigation // Journal of Physics: Conference Series . 2018. Vol. 1105, No. 012045. 5 P.
8.	Pecherkin N.I., Volodin O.A., Pavlenko A.N. , Kataev A.I., Mironova I.B.	Heat transfer enhancement experiments in R21 falling film over a bundle of MAO-coated horizontal tubes // Intern. Communications in Heat and Mass Transfer . – 2021. – Vol. 129. – 105743. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105743 . Q1. IF – 5.89
9.	Zhukov V.I.,	The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in a thin

	Pavlenko A.N., Shvetsov D.A.	horizontal liquid layer on a microstructured surface produced by 3D laser printing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 163, No.120488-1–120488-14. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120488. Q1. IF – 5.63.
10.	Li H., Yi F., Li X., Gao X., Pavlenko A.N.	Numerical simulation for falling film flow characteristics of refrigerant on the smooth and structured surfaces // Journal of Engineering Thermophysics. 2018. Т. 27. № 1. Q2. IF – 2.038.
11.	Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.	Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 2. С. 280-312. Q2. IF – 1.512.
12.	Lv Y., Liu M.Y., Hui L.F., Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Serdyukov V.S.	Heat transfer and fouling rate at boiling on superhydrophobic surface with TiO ₂ nanotube-array structure // Journal of Engineering Thermophysics. 2019. Т. 28. № 2. С. 163-176. Q2. IF – 2.038.
13.	Zhao Z., Li H., Li X., Gao X., Pavlenko A.N.	Flow pattern of miscellaneous liquids with varied flow rates on structured corrugation SiC foam packing // Journal of Engineering Thermophysics. 2019. Т. 28. № 3. С. 305-312. Q2. IF – 2.038.
14.	Serdyukov V.S., Volodin O.A., Bessmeltsev V.P., Pavlenko A.N.	Heat transfer enhancement during water pool boiling using capillary-porous coatings fabricated by 3D printing Capillary-Porous Coatings // Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31, N. 2. – P. 201- 209. DOI: 10.1134/S1810232822020011. IF – 2.038; Q3.
15.	Trushlyakov V.I., Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Urbansky V.A., Sukhorukova E.Yu., Mezentseva N.N.	Dynamics of liquid nitrogen in a closed vessel in the presence of helium pressurization gas // Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31, N. 2. – P. 210-222. DOI: 10.1134/S1810232822020023. Q3.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

10 января 2023 г.

ПОДПИСЬ

Сведения о Павленко Александре Николаевиче подтверждаю:

Удильский секретари

(должность)

Манапов М.С.
(ФИО)