

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.125.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 02.06.2023 № 11

О присуждении Верещагину Антону Сергеевичу, гражданину РФ, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 20.01.2023 г. (протокол № 4) диссертационным советом 24.1.125.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИТПМ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, утвержденным приказом Рособнадзора от 16.11.2007 (№ 2249-1603) и продлением срока полномочий приказом Минобрнауки России от 10.09.2009 (№591925-1734), подтверждением полномочий от 11.04.2012 (№ 105/нк) и изменениями от 08.06.2016 (№ 661/нк), от 3.08.2018 (№ 59/нк) и от 3.06.2021 (№ 561/нк).

Соискатель Верещагин Антон Сергеевич, 18.12.1980 года рождения,

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Математическое моделирование процессов обогащения газов с использованием ценосфер (на примере смеси газов аргона и гелия)» защитил в 2008 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории «Физики быстропротекающих процессов» ФГБУН ИТПМ СО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории «Физики быстропротекающих процессов» ФГБУН ИТПМ СО РАН.

**Научный консультант** – академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор Фомин Василий Михайлович, заведующий лабораторией «Физики быстропротекающих процессов» ФГБУН ИТПМ СО РАН, научный руководитель Института.

**Официальные оппоненты:**

**Павленко** Александр Николаевич, член-корр. РАН, доктор физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией низкотемпературной теплофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук;

**Шайдуров** Владимир Викторович, член-корр. РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор обособленного подразделения Института вычислительного моделирования СО РАН (ИВМ СО РАН) ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»;

**Урманчев** Саид Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

в своём положительном отзыве, подписанном доктором технических наук Жагфаровым Фирдавесом Гаптелфартовичем

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

Соискатель имеет 14 опубликованных работ по теме диссертации, из них 10 работ, входящих в перечень ВАК, два патента на изобретение и одну зарегистрированную программу для ЭВМ. Вклад автора в опубликованных работах состоит в постановке задач, разработке математических и численных моделей, проведении расчётов, анализе полученных данных и подготовке статей.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Численное моделирование обогащения воздушно-гелиевой смеси бифункциональным сорбентом на основе стеклянных микросфер / А. С. Верещагин [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63, № 5. – С. 3–19.

Работа посвящена анализу и валидации математической модели течения воздушно-гелиевой смеси через слой композитного сорбента с учётом поглощения гелия микросферами.

2. Верещагин А. С. Исследование процесса поглощения гелия микросферами и композитным сорбентом на их основе // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т. 62, № 3. – С. 60–70.

В работе приводится аналитическое решение задачи о сорбции гелия микросферами с учётом их дисперсионного распределения по размерам и коэффициентам проницаемости.

3. Модель адсорбции гелия и паров воды пористым композитным сорбентом на основе микросфер / А. С. Верещагин [и др.] // Доклады Российской Академии наук. Физика. Технические науки. – 2020. – Т. 490, № 1. – С. 18–23.

В работе на основании объёмного осреднения представлен вывод законов массопереноса для парогелиевой смеси газов, протекающей через адсорбер, с учётом её взаимодействия с покоящимся слоем из цилиндрических гранул композитного сорбента на основе микросфер.

4. Учет сопротивления и температуры при течении парогелиевой смеси через слой пористого композитного сорбента, созданного на основе микросфер / А. С. Верещагин // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т. 62, № 2. – С. 77–87.

В работе на основании объёмного осреднения представлен вывод законов сохранения импульса и энергии для парогелиевой смеси газов, протекающей через адсорбер, с учётом её взаимодействия с покоящимся слоем из цилиндрических гранул композитного сорбента на основе микросфер.

5. Математическая модель проницаемости микросфер с учётом их дисперсионного распределения / А. С. Верещагин [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 2. – С. 88–96.

В работе представлен вывод математической модели сорбции гелия микросферами в статических условиях с учётом их дисперсионного распределения по размерам и коэффициентам проницаемости.

**На диссертацию поступили следующие отзывы:**

**Ведущей организации – РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.**

Отмечается практическая значимость диссертационной работы, а также, что соискатель достиг решения поставленной задачи, проведя физико-математическое обоснование нового перспективного мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей. Замечания: 1. Автор утверждает, что мембранно-сорбционная технология – эффективная и не является капиталоемкой, но нигде не приводятся оценки эффективности. Данное утверждение требует комментариев. 2. В диссертации указано, что ценосферы выдерживают высокое гидростатическое давление, однако выдержит ли композитный сорбент, созданный на основе микросфер такие же высокие нагрузки или нужно будет снижать рабочее давление? 3. В диссертации математическая модель поглощения гелия в стационарных условиях строится в предположении отсутствия других газов. Как изменится процесс

поглощения гелия в присутствии других газов, таких как метан, углекислый газ и др. и паров воды в случае композитного сорбента? 4. Диссертант утверждает, что внутри композитного сорбента газы будут диффундировать по механизму кнудсеновской диффузии, но нигде нет оценок для числа Кнудсена. 5. Почему внутри композитного сорбента так мало микросфер (всего 15 % по массе)? Ведь это сильно уменьшает сорбционный объем?

**Официального оппонента член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Павленко А.Н.**

Отмечается, что диссертация Верещагина А.С. является завершённой 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, описывающее гидродинамику и массообмен в смесях газов в среде с мембранно-сорбционным материалом. Решена крупная научно-техническая проблема по физико-математическому обоснованию разработки мембранно-сорбционного метода извлечения гелия из газовых смесей. Вопросы и замечания: 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 расчёты для полного моделирования процесса выделения гелия в рамках коротко-циклового 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 до 120 °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 ёмкости 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. с. 29, 32–34, 81, 87, 91, 124, 125, 127, 146, 149, 150, 178).

**Официального оппонента член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Шайдунова В.В.**

Отмечается, что исследование выполнено на хорошем теоретическом уровне, а достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных методов математического моделирования. Замечания: 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.

**Официального оппонента д.ф.-м.н. Урманчеева С.Ф.** Отмечается, что полученные в диссертации результаты являются существенным вкладом в науку и производственную практику и свидетельствуют о значимом развитии механики многофазных сред, расширяя сферы её применения. Подчёркивается стремление соискателя к учёту деталей рассмотренных процессов и особенностей полученных математических моделей. Также отмечается, что результаты и выводы могут быть использованы в учебных курсах по механике многофазных сред и математическому моделированию технологических процессов. Замечания: 1. В диссертации содержится ряд опечаток, иногда затрудняющих чтение текста. Например, на с. 38 введено обозначения площади сферической поверхности  $S_0$ , а в формуле (2.5) тем же символом обозначен массовый поток гелия. На с. 37 через  $p_1$  и  $p_2$  обозначено давление гелия снаружи и внутри микросферы, соответственно, а на с. 39 и далее давление внутри микросферы записано как  $p_{21}$ . На с. 37 радиусы полости и внешний радиус микросферы обозначены через  $a$  и  $b$ , а на с. 39 уже через  $r$  и  $R$ . 2. В тексте под рис. 3.5 не указано, чему соответствует те или иные линии, характеризующие изменение давления на различных датчиках. 3. Представляется неудачным оформление зависимостей, изображённых на рис. 4.32, так как невозможно отличить одну линию от другой и чему каждая из них соответствует по «легенде». Между тем эти зависимости несут ценную информацию! 4. В диссертации используется достаточно обширный список обозначений. Было бы целесообразно привести его в самом начале текста и в дальнейшем придерживаться единой формы обозначений. 5. Задачи механики многофазных сред описываются уравнениями с большим числом параметров. В этой связи уместно применять безразмерную форму записи уравнений с введением соответствующих критериев подобия. В этом случае можно было бы наглядно продемонстрировать вклад каждого слагаемого в том или ином уравнении. 6. В качестве замыкающих соотношений в математических моделях, представленных в диссертации, приняты уравнения состояния идеального газа. При течении парогелиевой смеси газов в слое адсорбента применение упрощённых соотношений требует обоснования, основанного на соответствующих оценках. Дело в том, что уравнения состояния реальных газов позволило бы учесть эффект Джоуля-Томсона, который может привести к охлаждению водяного пара и, затем, к его конденсации на определённом участке адсорбера, что может повлиять, в свою очередь, на проницаемость микросфер. В случае нестационарных процессов можно было бы также обратиться к исследованию влияния баротермического эффекта на изменение температуры при фильтрации смеси газов. 7. Разработанные математические модели предусматривают проведение расчётов процессов конвекции и диффузии с учётом

теплообмена. Однако в тексте диссертации не приведены данные по изменению температуры ни при прохождении гелия через мембрану, ни при фильтрации смеси газов сквозь насыпки микросфер или сорбента в адсорбере. Можно ли продемонстрировать результаты расчётов изменения температурных полей в рассматриваемых фильтрационных процессах? Подставляется, что эти результаты были бы интересны, по крайней мере, с научной точки зрения.

#### **Отзывы на автореферат:**

Д.х.н., проф. **Аншица Александра Георгиевича**, заведующего лабораторией каталитических превращений малых молекул ИХХТ СО РАН. Отзыв положительный. Замечания: 1. В автореферате приведены очень ограниченные физико-химические данные об используемых микросферах и композитном сорбенте; название образцов длинны, не расшифрованы и затрудняют восприятие; рис. 9 труден для понимания в черно-белом формате. 2. Исходя из определения, величина  $\alpha = V_{21}/V_1$  (с. 11) связана с геометрическими характеристиками частиц и сорбционного аппарата и не зависит от условий эксперимента. Поэтому непонятно отличие значений  $\alpha$  для образца МС-ВП-А9, приведённые на рис. 2 (с. 12, сорбция при 110 °С). 3. Автор отмечает, что «основной интерес представляет математическая модель течения трехкомпонентной парогелиевой смеси газов через адсорбер, заполненный композитным сорбентом» (с. 16). При этом далее рассматривается упрощённый вариант течения воздушно-гелиевой смеси. Было бы интересно знать, возможно ли в рамках предложенного подхода моделирование парогазовых смесей и насколько изменятся принципиальные выводы при учёте теплового эффекта взаимодействия паров  $H_2O$  с  $\gamma-Al_2O_3$  – компонентом композиционного сорбента.

Д.ф.-м.н., проф. **Ревуженко Александра Филипповича**, главного научного сотрудника лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред и д.ф.-м.н. **Лаврикова Сергея Владимировича**, старшего научного сотрудника ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Отзыв положительный, замечаний нет.

Д.т.н., проф. **Саленко Сергея Дмитриевича**, заведующего кафедрой аэрогидродинамики Новосибирского государственного технического университета. Отзыв положительный. Замечания: 1. В диссертации не проводится чёткого сравнения различных методов выделения гелия из природного газа с точки зрения эффективности. 2. Известно, что микросферы также проницаемы для других инертных газов и водорода. Может ли это исследование быть полезным для извлечения и разделения этих газов? 3. В диссертации проницаемость микросфер берётся как данность. Есть ли возможность ею управлять в достаточно широком диапазоне значений? 4. Циклы мембранно-сорбционного метода длятся достаточно длительное время (в зависимости от проницаемости микросфер от нескольких минут до нескольких часов). Как модернизировать цифрового двойника, чтобы уменьшить время, получения обогащённой смеси?

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** тем, что официальные оппоненты – признанные высокопрофессиональные специалисты в областях, непосредственно связанных с темой диссертации: член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Павленко А.Н. – специалист в области гидродинамики и процессов теплопереноса в двухфазных потоках, нестационарного теплообмена при фазовых превращениях; член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Шайдуров В.В. – специалист в области численных методов решения задач математической физики, математического моделирования сложных физических процессов и прикладной информатики; д.ф.-м.н. Урманчеев С.Ф. – специалист в области математических моделей механики многофазных сред, волновых процессов в насыщенных пористых средах, термогидродинамики, математическом моделировании технологических процессов. Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» – один из крупнейших научных центров, в приоритетные направления которого входит «рациональное освоение и эффективное использование природных ресурсов – повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, разведка и освоение месторождений с трудноизвлекаемыми запасами и нетрадиционными источниками углеводородов», а среди основных направлений научных исследований можно выделить «машины, оборудование и материалы для нефтегазовой отрасли» и «химические технологии».

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**установлена** возможность использования микросфер и сорбентов на их основе для выделения гелия из гелий-содержащих смесей с получением высокой концентрации гелия в продукционном газе при его высокой степени извлечения; установлен характер распределения проницаемостей сорбентов по отношению к сорбционному объему для различных партий образцов микросфер и композитного сорбента на их основе; установлена гиперболичность системы одномерных квазилинейных дифференциальных уравнений, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии при течении многокомпонентной газовой смеси через покоящийся слой из композитного сорбента на основе микросфер;

**разработана** новая физико-математическая модель поглощения гелия сорбентом, состоящим из полых сферических частиц в условиях дисперсионного распределения коэффициентов проницаемости микросфер (включающее распределение как по размерам, так и по коэффициентам проницаемости материала); 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; разработан цифровой двойник крупномасштабной установки для

моделирования процесса выделения гелия на месторождении или заводе по переработке природного газа;

**численно проведено** моделирование фазы обогащения в методе короткоциклового адсорбции с использованием бифункционального сорбента на основе микросфер, которое показало возможность кратного увеличения концентрации гелия в воздушно-гелиевой смеси при высокой степени его извлечения; с использованием цифрового двойника крупномасштабной установки проведено моделирование в соответствии с регламентом мембранно-сорбционного метода, показавшее возможность выделения концентрата с высоким содержанием гелия при высокой степени его извлечения.

**Теоретическая значимость** работы обоснована тем, что разработанная в диссертации математическая модель сорбции гелия микросферами и сорбентами на их основе в стационарных условиях с учётом дисперсионного распределения по коэффициентам проницаемости микросфер, позволяет описать широкий класс сорбентов, без привлечения дополнительных измерений и анализа исходных образцов, а также тем, что новая оригинальная модель механики многофазных сред дает возможность описать нестационарное течение смеси газов через среду из композитного сорбента на основе микросфер.

**Значение** полученных соискателем результатов исследований для **практики** подтверждается тем, что в результаты 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 транспортировке. Разработанные алгоритмы позволяют количественно описать временные зависимости поглощения гелия микросферами, а также выполнить расчёт основных циклов в методе короткоциклового безнагревной адсорбции, где в качестве сорбента используются микросферы и сорбенты на их основе. Результаты диссертации можно рекомендовать для использования в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ», ПАО «Криогенмаш», Российской научно-производственной компании (НПК) «Грасис», на заводах по переработке природного газа (Амурском, Оренбургском ГПЗ) и при подготовке природного газа к транспортировке.

**Оценка достоверности** полученных результатов обеспечивается тем, что в работе используются классические надежные методы построения и анализа математических моделей сплошных многофазных сред. Численные алгоритмы созданы на основе хорошо разработанной для такого типа моделей теории разностных схем и верифицированы на экспериментальных данных. Результаты исследования находятся в соответствии с данными других авторов.

**Личный вклад** соискателя состоит в постановке задач и обосновании цели исследования, разработке математических и численных моделей, проведении



численного моделирования, анализе и обобщении результатов, подготовке публикаций.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 02.06.2023 г. диссертационный совет принял решение за физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей, что можно квалифицировать как научное достижение в области механики многофазных систем и пористых сред, присудить Верещагину А.С. учёную степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 13 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвующих в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 1, недействительных бюллетеней – 0.

Ио председателя  
диссертационного совета

ентьевич

Учёный секретарь  
диссертационного совета

ександрович

« 05 » 06 2023