

О Т З Ы В

**Официального оппонента 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 выполненной работы.

Представленная работа посвящена теоретическому и экспериментальному обоснованию мембранно-сорбционного метода выделения гелия из смеси газов, в том числе и природного газа.

Гелий представляет собой стратегический продукт, потребность которого постоянно растёт во многих сферах экономики. Он совершенно необходим в атомной и космической промышленности, электронике, медицинской технике. Благодаря своим уникальным физическим свойствам гелий широко используется в криогенных системах, в том числе в системе охлаждения Большого адронного коллайдера, рабочее состояние которого должно поддерживаться при температуре не выше -271°C .

Содержание гелия на Земле ничтожно мало, а его извлечение, в основном из природного газа, – достаточно трудоёмкий и дорогостоящий процесс. Мировое производство гелия в настоящее время составляет порядка 190 млн кубометров в год. При этом годовые потребности в гелии к 2030 году составят уже около 300 млн кубометров, что превышает прогнозируемые оценки по его производству к этому времени. Дальнейшее наращивание производства гелия возможно только на основе новых эффективных методов его получения. В настоящей диссертации предложен мембранно-сорбционный метод с использованием силикатных микросфер в качестве микроёмкостей для гелия.

Для установления требуемых расчетных параметров и определения оптимальных условий технологии извлечения гелия мембранно-сорбционным методом автором диссертации были разработаны математические модели процессов поглощения гелия микросферами и течения смесей гелийсодержащих газов через гранулированные насыпные среды. В русле поставленных задач необходимой составляющей исследований было экспериментальное определение коэффициентов проницаемости стенок силикатных микросфер, являющихся параметрами модели и задаваемых при проведении модельных расчетов.

Комплекс научных исследований, проведённый автором в совокупности с практическими рекомендациями и выводами, способствующими повышению эффективности и снижению себестоимости производства по выделению гелия из гелийсодержащих газов, безусловно свидетельствуют об **актуальности** научной темы диссертационной работы.

Связь темы работы с планами соответствующей отрасли науки и народного хозяйства.

Исследования, изложенные в диссертации, проводились при поддержке междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН №12 (2009-2011) и №91 (2012-2014), программ Фундаментальных исследований Президиума РАН (2014-2017) и СО РАН (2018-2020), грантов РФФИ (2018-2019, 2021) и ряда других грантов, связанных с созданием избирательно проницаемых объектов по отношению к лёгким газам, исследованию механизмов проницаемости твёрдых полых мембран и математическому моделированию обогащения гелия с использованием микросфер.

Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В научном плане новизна результатов диссертационной работы А.С. Верещагина состоит, прежде всего, в научном обосновании оригинальной

технологии и создании цифрового двойника установки для извлечения гелия из гелийсодержащих газов. При этом был решён ряд оригинальных задач и получены новые результаты в области механики многофазных сред и математического моделирования.

Прежде всего отметим, что впервые была создана математическая модель поглощения гелия силикатными микросферами с учётом распределения их внутреннего объёма и проницаемости. Особенностью модели является разделение совокупности всех микросфер на классы эквивалентности по коэффициенту проницаемости. Заметим, что эта классификация привела к сокращению объёма вычислений. В конечном итоге, математическая модель, представленная в форме интегрального уравнения Фредгольма II рода, позволила решить обратную задачу по определению количества групп эквивалентных микросфер, а также их физические и геометрические параметры по экспериментальной зависимости поглощения гелия сорбентом.

Для математической модели о поглощении гелия сорбентов в виде системы дифференциальных уравнений было получено аналитическое решение, позволившее получить ряд теоретических оценок. При этом было доказано, что число гармоник, на которые раскладывается функция, описывающая массу гелия в свободном объёме адсорбера, равно числу групп микросфер.

Важнейшим результатом диссертационной работы представляется создание нестационарной модели течения смеси гелийсодержащих газов и микросфер. Следует подчеркнуть, что автор, основываясь на классических идеях механики многофазных сред, заново провёл процедуры осреднения законов сохранения массы, импульса и энергии с учётом особенностей рассматриваемой системы проницаемых по гелию частиц и смеси газов. Таким образом, можно утверждать, что получена оригинальная система уравнений и предложена новая математическая модель многофазной среды.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации

Приведенный в диссертационной работе А.С. Верещагина перечень научных положений, выносимых на защиту в должной мере отражает результаты проделанной работы и основан на итоговых научных выводах.

Автор в процессе исследований чётко придерживался фундаментальных принципов построения математических моделей, а физические параметры моделей определялись с использованием экспериментальных данных. Наиболее важным в этом смысле результатом является определение аутентичных значений числа классов эквивалентности микросфер и соответствующих им геометрических и физических параметров, которые в дальнейшем использовались в расчётах течения смеси газов как совместно с микросферами, так и сквозь пористые слои адсорбента, включающего в себя микросферы. Задача была решена с использованием экспериментальной зависимости поглощения гелия сорбентом на основе постановки обратной задачи для интегрального уравнения Фредгольма II рода.

Важную роль для обоснования выводов в процессе исследований играли удачно подобранные тестовые задачи, а также тщательный анализ свойств матриц систем дифференциальных уравнений и свойств ядра интегрального уравнения, полученных автором. Кроме того, численные алгоритмы были верифицированы путём сравнения с экспериментальными данными. Также следует отметить аккуратные и подробные выкладки, связанные с выводом математических моделей и теоретические исследования самих моделей. В частности, исследования конвективной составляющей модели течения воздушно-гелиевой смеси на гиперболичность позволили определить характеристические направления системы квазилинейных дифференциальных уравнений.

В целом, полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Значимость для науки и практики полученных результатов.

Полученные в диссертации результаты являются существенным вкладом в науку и производственную практику. Описанные выше новые результаты, представленные в диссертации, свидетельствуют о значимом развитии механики многофазных сред, расширении сферы её применения. Следует также подчеркнуть стремление автора к учёту деталей рассмотренных процессов и особенностей полученных математических моделей.

Особое место в исследованиях автора занимает создание цифрового двойника мембранно-сорбционной установки по выделению гелия из природного газа. Эта часть работы наглядно подтверждает практическую значимость диссертации. Она является основой для проектирования промышленных установок. И, что очень важно, каждый блок цифрового двойника обоснован предшествующими теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в исследованиях академических и отраслевых институтов, проектных организаций и конструкторских бюро. Материалы диссертации могут быть использованы также в учебных курсах по механике многофазных сред и математическому моделированию технологических процессов.

Замечания по работе.

1. В диссертации содержится ряд опечаток, иногда затрудняющих чтение текста, например,

1.1. На с.38 введено обозначение площади сферической поверхности S_0 , а далее, в формуле (2.5) тем же символом обозначен массовый поток гелия.

1.2. 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} .

1.3. На с.37 радиусы полости и внешний радиус микросферы

обозначены через a и b , соответственно, а на с.39 уже через r и R .

2. В тексте под Рисунком 3.5 не указано, чему соответствуют те или иные линии, характеризующие изменение давления на различных датчиках.

3. Представляется неудачным оформление зависимостей, изображённых на Рисунке 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 паро-гелиевой смеси газов в слое адсорбента применение упрощенных соотношений требует обоснования, основанного на соответствующих оценках. Дело в том, что уравнения состояния реальных газов позволили 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? Представляется, что эти результаты были бы интересны, по крайней мере, с научной точки зрения.

Заключение по работе.

Оценивая диссертационную работу в целом, можно утверждать, что полученные результаты являются новыми, достоверными и представляют несомненный научный и практический интерес.

Содержание диссертации в полной мере отражено в публикациях автора, включая издания, рекомендованные ВАК для представления материалов к защите докторских диссертаций. Результаты работы многократно обсуждались на российских и международных научных конференциях, а практическая значимость результатов подтверждена патентами.

В представленной диссертационной работе на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в механике многофазных сред и математическом моделировании технологических процессов. В результате проведённых исследований выработаны практические рекомендации по реализации технологического процесса извлечения гелия из гелийсодержащих смесей газов мембранно-сорбционным методом и разработаны методы расчёта его параметров.

Указанные замечания не отражаются на общей положительной оценке выполненной работы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пунктами **9-11, 13, 14** Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 18.03.2023), а ее автор, **Верещагин Антон Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**.

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор, главный научный сотрудник
лаборатории «Механика»
ИМех УФИЦ РАН

+7-927-233-99-02
e-mail: said52@mail.ru (said52@mail.ru)

Подпись Урманчеева С.Ф. за
Учёный секретарь ИМех
канд. физ.-мат. наук

(347) 235-52-55
e-mail: us_imech@anrb.ru

Урманчеев Саид Федорович

«05» мая 2023 года

Урманчеева Элина Фанилевна

Институт механики имени Г.Г. Магданяна — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН).

450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 71, (347) 235-52-55, imran@anrb.ru

Я, Урманчеев Саид Федорович, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Верещагина Антона Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

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

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Урманчиев Саид Федорович, 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	01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы
Ученое звание	Профессор
Академическое звание	–
Тел:	+7 (927) 233-99-02
E-mail:	said52@mail.ru
Должность	Главный научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория «Механика многофазных систем»
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Институт механики им. Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	Россия, 450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71
Web-сайт организации.	http://uimech.org/
Телефон организации.	+7 (347) 235-52-55
E-mail организации.	imran@anrb.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.	Garafutdinov R.R., Chemers D.A., Sakhabutdinova A.R., Moiseev K.V., Urmancheev S.F., Mikhaylenko S.I., Privalov L.Yu., Chemers A.V	Convective polymerase chain reaction in standard microtubes// Analytical Biochemistry, Volume 641, 15 March 2022, 114565
2.	Мухутдинова А.А., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф.	Влияние переменных теплофизических свойств на течение вязкой жидкости в кольцевом канале // Вестник Башкирского университета, 2022. Т. 27. № 4. С. 847-851.
3.	Галеева Д.Р., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф.	Влияние теплообмена на гидравлическое сопротивление при течении термовязкой жидкости в коническом диффузоре // Вестник Башкирского университета. 2022. Т. 27. № 4. С. 852-857.
4.	Nizamova A.D., Murtazina R.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F	Features of Laminar-Turbulent Transition for the Coolant Flow in a Plane Heat-Exchanger Channel// Lobachevskii Journal of Mathematics, 2021, Vol. 42, No. 9, pp. 2211–2215
5.	Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф.	К расчёту местного гидравлического сопротивления канала при внешнем нагреве// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, 2021, Т. 25, № 3 (93). С. 34–41
6.	Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф.	О неизотермической задаче устойчивости течения вязкой жидкости в плоском канале// Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, 2021. Т. 25. № 4 (94). С. 76-82.
7.	Шарафутдинов З.З., Исламов И.Р., Груздев В.А., Зотов В.О., Капаев Р.А., Урманчиев С.Ф.	Оценка состояния ствола скважины для протаскивания трубопровода при сооружении подводных переходов// Нефтяное хозяйство, 2020. № 1. С. 96-101.
8.	Шарафутдинов З.З., Урманчиев С.Ф., Капаев Р.А.	Оценка готовности скважины к протаскиванию трубопровода при строительстве подводного перехода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2020. Т. 10. № 5. С. 470-478.
9.	Киреев В.Н., Низамова А.Д., Урманчиев С.Ф.	Некоторые особенности гидродинамической неустойчивости течения термовязкой жидкости в плоском канале // Прикладная математика и механика, 2019. Т. 83. № 3. С. 478-483.
10.	Кулешов В.С., Моисеев К.В., Урманчиев С.Ф.	Изолированные режимы течений при конвекции аномально термовязкой жидкости в плоской ячейке // Прикладная математика и механика, 2019. Т. 83. № 3. С. 484-494.
11.	Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F.	The hydraulic resistance of thermoviscous liquid flow in a plane channel with a variable cross-section// Journal of Physics: Conference Series, 2019, Volume 1158, Issue 3, No. 032014
12.	Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Урманчиев С.Ф.	Определение оптимального радиуса кривизны скважины для сооружения подводного перехода// Нефтяное хозяйство, 2019. № 2. С. 90-93.

13.	Шарафутдинов З.З., Урманчиев С.Ф., Исламов И.Р.	Протаскивание трубопровода в скважину, построенную в осложненных горно-геологических условиях// Нефтяное хозяйство, 2019, № 11. – С. 139-143
14.	Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Урманчиев С.Ф.	Работоспособность бурильной колонны при строительстве подводных переходов трубопроводов методом наклонно направленного бурения// Нефтяное хозяйство, 2018, № 5. – С. 88-92
15.	Kuleshov V.S., Moiseev K.V., Khizbullina S.F., Mikhaylenko K.I., Urmancheev S.F.	Convective Flows of Anomalous Thermoviscous Fluid // Mathematical Models and Computer Simulations, 2018. Т. 10. № 4. С. 529-537.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

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

23.01.2023

.Ф. Урманчиев

Подпись Урманчиева С.Ф. заверяю:
Учёный секретарь ИМех УФИЦ РАН,
к.ф. – м.н.



.Ф. Гайнуллина