

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Верещагина Антона Сергеевича «Физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелий-содержащих смесей», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Промышленное производство гелия – ключевого элемента для множества отраслей промышленности в высокотехнологичном сегменте – основано на криогенной технологии. Этот подход является безальтернативным в случае переработки значительных объемов природного газа, однако его эффективность быстро падает при снижении объемов и росте содержания в газах балластного азота. Разрабатываемые в настоящее время альтернативные криогенному способу выделения гелия, основанные на иных физических принципах – с использованием селективных мембран или сорбентов – являются, несомненно, актуальными, в частности, для переработки газов низкодебитных скважин с высоким содержанием гелия. В представленном автореферате суммировано физико-математическое обоснование разработанного и апробированного в ИТПМ СО РАН оригинального метода разделения гелийсодержащих газовых смесей, сочетающего в себе преимущества мембранной и сорбционной технологий. Основой подхода является использование полых микросфер, сорбционные свойства которых в отношении гелия реализуются за счет селективной диффузии He во внутренний объем частиц через алюмосиликатную стенку (мембрану), что обеспечивает чрезвычайно высокую «селективность» поглощения. Необходимо отметить, что этот подход является пионерским, в литературе практически отсутствуют как примеры практической реализации подобных технологических схем, так и теоретическое описание соответствующих процессов.

В представленной работе впервые разработана математическая модель поглощения гелия полыми сферическими частицами с учетом дисперсии коэффициентов проницаемости и размеров частиц и получено в общем виде аналитическое решение задачи. Полученная модель успешно применена для описания экспериментальных данных и позволила с погрешностью до 1 % описать процесс поглощения гелия микросферами. В рамках выполнения работы создан композитный сорбент микросферы/ $\gamma$ - $Al_2O_3$ , изучены его сорбционные характеристики. С применением формализма механики многофазных сред разработана модель течения смеси He– $H_2O$ –воздух через слой неподвижного сорбента при реализации режима короткоцикловой безнагревной адсорбции, проведен анализ корней характеристического уравнения и осуществлена верификация численного алгоритма при фильтрации газа через пористую среду и распространения волны давления,

показано качественное и количественное совпадение эксперимента и расчётных данных. Важно отметить, что на основании теоретических исследований автором создан и зарегистрирован цифровой двойник (цифровая модель сорбционной установки для извлечения гелия), обеспечивающий оптимизацию технологических режимов разделения и облегчающий доведение работы до практического уровня.

При рассмотрении содержания автореферата возникают вопросы и замечания, связанные, в основном, с его ограниченным объемом.

1. В автореферате приведены очень ограниченные физико-химические данные об используемых микросферах и композитном сорбенте; названия образцов длинные, не расшифрованы и затрудняют восприятие; рисунок 9 труден для понимания в черно-белом варианте.
2. Исходя из определения, величина  $\alpha = V_{21}/V_1$  (стр.11) связана с геометрическими характеристиками частиц и сорбционного аппарата и не зависит от условий эксперимента. Поэтому, является непонятным отличие значений  $\alpha$  для образца МС-ВП-А9, приведенные на Рис. 2 (стр.12, сорбция при 110°C).
3. Автор отмечает, что «основной интерес представляет математическая модель течения трехкомпонентной парогелиевой смеси газов через адсорбер, заполненный композитным сорбентом», стр. 16. При этом далее рассматривается упрощенный вариант течения воздушно-гелиевой смеси. Было бы интересно знать, возможно ли в рамках предложенного подхода моделирование парогазовых смесей и насколько изменятся принципиальные выводы при учете теплового эффекта взаимодействия паров  $H_2O$  с  $\gamma-Al_2O_3$  – компонентом композиционного сорбента.

Данные замечания являются частными и не умаляют значимости диссертационной работы А.С.Верещагина. Достоверность результатов работы подтверждается достаточной апробацией результатов на научных конференциях различного уровня, публикациями в известных рецензируемых изданиях и патентами РФ.

Диссертационная работа Верещагина А.С. является законченным научным исследованием и вносит значительный вклад в решение комплекса фундаментальных и прикладных задач, связанных с теоретическим описанием и практической реализацией нового мембранно-сорбционного способа разделения газовых смесей. Из сказанного выше следует, что диссертационная работа «Физико-математическое обоснование мембранно-сорбционного метода выделения гелия из гелийсодержащих смесей» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а автор работы, Антон

Сергеевич Верещагин, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Аншиц Александр Георгиевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заведующий лабораторией каталитических превращений малых молекул ИХХТ СО РАН,  
доктор химических наук, профессор

Александр Георгиевич Аншиц

Дата: 26.04.2023 г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)

Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИХХТ СО РАН)  
Академгородок, 50, стр.24, г. Красноярск, 660036  
Телефоны: (391) 205 19 50, (391) 205 19 43, E-mail: chem@icct.ru  
anshits@icct.ru

Подпись д.х.н., профессор  
А.Г. Аншица заверяю:

Ученый секретарь ИХХТ  
кандидат химических наук

Ю.Н. Зайцева