

УДК: 66.081.6-278

### РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ

М. Кошцев, А. Дюсамбаев

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. Е.Б. Кашкаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mok13@tpu.ru](mailto:mok13@tpu.ru)

### DEVELOPMENT OF AN INSTALLATION FOR THE STUDY OF GAS PERMEABILITY

M. Koptsev, A. Dyusambaev

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD E.B. Kashkarov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [mok13@tpu.ru](mailto:mok13@tpu.ru)

**Abstract.** Gas separation membranes are considered a promising technology due to their compactness, energy efficiency, and scalability. One of the promising types of membranes are Pd based membranes with porous  $Al_2O_3$  support. Porous supports are considered as highly permeable substrates for thin hydrogen-permeable membranes in the processes of hydrogen extraction and purification, as well as carbon dioxide capture and storage. Typically, porous membranes undergo surface modification. As a result, it is required to study the individual contributions of the porous substrate and surface to the gas permeability. For this purpose, a special permeability unit chamber was developed based on the Gas Reaction Automated Machine (GRAM).

**Введение.** Мембраны для разделения газов считаются перспективной технологией благодаря их компактности, энергоэффективности, масштабируемости. Одним из перспективных типов мембран являются металлические водородопроницаемые мембраны на основе Pd, высокоэнтропийных сплавов и др., нанесенные на специальные микропористые поддержки. Пористые поддержки, например, из оксида алюминия, рассматриваются в качестве высокопроницаемых подложек для тонких водородопроницаемых мембран в процессах выделения и очистки водорода, а также улавливания и хранения углекислого газа [1]. В связи с тем, что указанные мембраны представляют собой многослойную систему, при разработке таких материалов требуется исследование, как отдельных элементов мембран, так и мембраны в целом. Таким образом, целью настоящей работы была разработка отечественной системы для диагностики мембранных материалов на базе автоматизированного комплекса Gas Reaction Automated Machine (GRAM).

**Материалы и методы.** Для исследования газопроницаемости была разработана и изготовлена испытательная камера. Камера представляет собой цилиндрическую конструкцию с поджимным резбовым механизмом для обеспечения газоплотного соединения прилегающего образца к выходному отверстию, через которое регистрируется проходящий поток газа через мембрану. Система оснащена масс-спектрометром для анализа пропускаемых через мембрану газов. Держатель изготовлен таким образом, чтобы обеспечить равномерное прижатие анализируемого образца.

Испытания на проницаемость проводились на автоматической установке управления газовыми процессами GRAM. Схема разработанной системы для проведения эксперимента приведена на рисунке

1. В качестве рабочего газа применялся аргон. Камера вакуумировалась до давления  $10^{-3}$  Па и нагревалась до необходимой температуры, после чего подавался газ. Протекающий через образец газ анализировался масс-спектрометром [2].

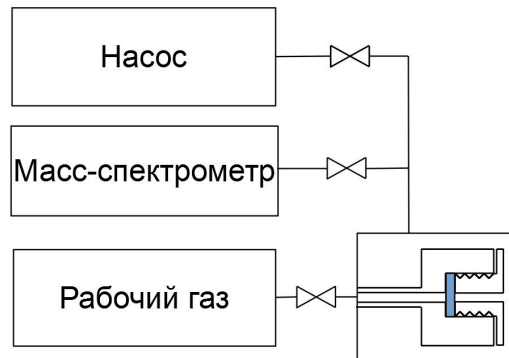


Рис. 1. Схема испытательной установки

Основными характеристиками мембраны являются поток газа и проницаемость. Поток представляет собой общий перенос вещества через мембрану и может быть выражен в виде массы или молярной концентрации в единицу времени на единицу площади (1). Проницаемость определяется как поток на единицу разницы давлений между входной и выходной стороной мембраны [3]. Поток газа рассчитывался как разница концентрации газа, прошедшего в единицу времени через площадь образца. Концентрация газа рассчитывалась исходя из кривых уменьшения давления в камере (рис. 2А).

$$\Phi = J \cdot \frac{\Delta P}{d}, \quad (1)$$

где:  $\Phi$  – поток газа (моль  $\cdot$  м<sup>-2</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>),  $J$  – газовая проницаемость (моль  $\cdot$  м<sup>-1</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>  $\cdot$  Па<sup>-1</sup>),  $d$  – толщина образца (м),  $\Delta P$  – разница давлений на входе и выходе образца.

Для определения концентрации газа, значения внутреннего объема ёмкости с газом, тракта подачи газа и объема исследовательской камеры были откалиброваны.

**Результаты.** В рамках данной работы были исследованы пористые образцы, изготовленные с применением аддитивных технологий, на предмет газопроницаемости. Образцы 1,2,3 были изготовлены в одном технологическом процессе в воздушной атмосфере, образец 4 был изготовлен в вакууме.

Поток газа регистрировался по снижению давления со стороны подачи газа, как показано на рисунке 2А. Была рассчитана проницаемость образцов (таблица 1) и построены потоки газа в зависимости от разности давления. Поток газа через мембрану линейно зависит от давления (рисунок 2Б). Это может свидетельствовать о том, что размеры пор сопоставимы или меньше длины свободного пробега газа в мембране. Исходя из модели вязкого течения Пуазейля (2), можно оценить радиусы пор (таблица 1).

$$r = \sqrt{\frac{8}{\pi} \times \mu \times \Phi \times \frac{d}{\Delta P}}, \quad (2)$$

где:  $\mu$  – динамическая вязкость газа (Па  $\cdot$  с).

Стоит отметить, что данная модель предполагает наличие сквозных цилиндрических пор. Однако, с помощью данной модели можно оценить пористость полученных образцов.

Таблица 1

Значения проницаемости, радиуса пор и отношения длины свободного пробега газа к диаметру пор

№	$J, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$	$r, \text{ нм}$	$\lambda / (2 \cdot r)$
1	$1,2 \times 10^{-9}$	33	1,09
2	$2,6 \times 10^{-9}$	58	0,63
3	$4,5 \times 10^{-9}$	75	0,48
4	$4,6 \times 10^{-8}$	244	0.3

Для подтверждения правильности выбранной модели была рассчитана длина свободного пробега газа в мембране (3). Если отношение длины свободного пробега частицы в пористом образце к диаметру пор равно или меньше 1, то процесс протекает по модели вязкого течения Пуазейля.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{k \cdot T}{\pi \cdot d_s^2 \cdot P} = 7,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \quad (3)$$

где:  $d_s$  – эффективный радиус молекулы газа,  $k$  – постоянная Больцмана.

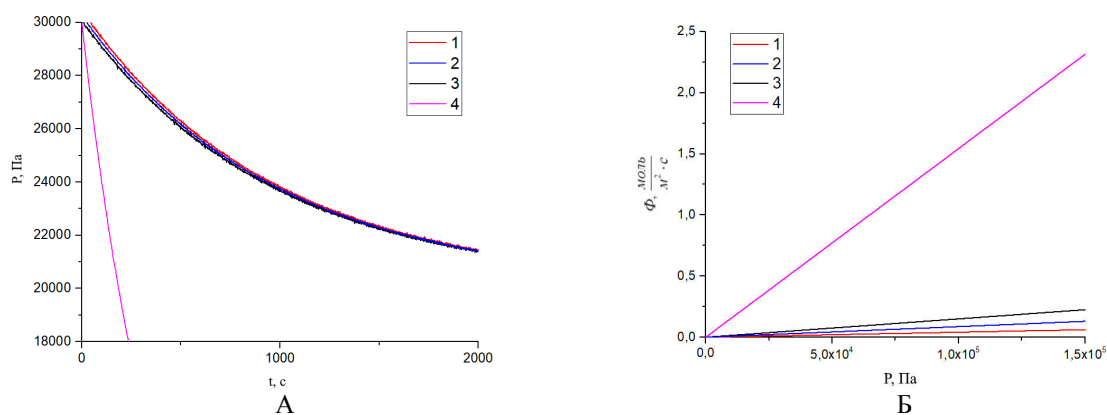


Рис. 2. Зависимости изменения давления во впускной камере от времени (А) и потока газа от давления (Б)

**Закключение.** В ходе работы была спроектирована и изготовлена исследовательская камера для исследования проницаемости мембранных материалов. Камера была откалибрована для проведения исследований на газопроницаемость. Были исследованы образцы, изготовленные из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  методом аддитивных технологий. Были определены потоки газа через образцы, рассчитана газопроницаемость и произведена оценка пористости образцов. Показана возможность использования разработанной камеры для исследования проницаемости материалов на установке GRAM.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2021-0017.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Isobe T. et al. Preparation and gas permeability of the surface-modified porous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic filter for  $\text{CO}_2$  gas separation // Journal of Asian Ceramic Societies. – 2013. – Vol. 1. – №. 1. – P. 65-70.
2. Wałowski G. Assessment of gas permeability coefficient of porous materials // Journal of Sustainable Mining. – 2017. – Vol. 16. – №. 2. – P. 55-65.
3. Nagy E. Basic equations of mass transport through a membrane layer // Elsevier. – 2018. – P. 457-481.