

УДК 621.521

Вакуумная система для оценки удельной газопроницаемости ткане-пленочных материалов

Епанешникова Анастасия Максимовна^(*)

eam963@yandex.ru

Киреев Александр Русланович

kireev.cfif@gmail.com

Погорелый Даниэль Олегович

d.pogorelyi.d@mail.ru

Свичкарь Елена Владимировна

svic@bk.ru

SPIN-код: 4532-7592

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Разработана специализированная вакуумная аналитическая установка для экспериментального определения коэффициента удельной газопроницаемости многослойных ткане-пленочных композитов в условиях, моделирующих эксплуатацию в оболочках высотных стратостатов. Ключевой особенностью системы является возможность воспроизведения комплекса экстремальных факторов стратосферы: температурный режим до -70°C , рабочие давления 5–10 кПа и определение сверхмалых потоков легких газов (He , H_2). Представлены научное обоснование, конструкторское решение установки, описание датчиков и оценка погрешности измерений.

Ключевые слова: газопроницаемость, материал оболочки, ткане-пленочные материалы, стратостат, вакуумная установка

Vacuum system for assessing the specific gas permeability of fabric-film materials

Epaneshnikova Anastasiya Maksimovna^(*)

eam963@yandex.ru

Kireev Alexander Ruslanovich

kireev.cfif@gmail.com

Pogorelyi Daniel Olegovich

d.pogorelyi.d@mail.ru

Svichkar Elena Vladimirovna

svic@bk.ru

SPIN-code: 4532-7592

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. A specialized vacuum analytical facility has been developed for the experimental determination of the coefficient of specific gas permeability of multilayer fabric-film composites under conditions simulating operation in the shells of high-altitude stratostats. The key feature of the system is the ability to reproduce a complex of extreme stratospheric factors: temperature conditions up to -70°C , operating pressures of 5–10 kPa and the determination of ultra-low fluxes of light gases (He , H_2). The paper presents a scientific justification, a design solution for the installation, a description of the sensors and an estimate of the measurement error.

Keywords: gas permeability, shell material, fabric-film materials, stratostat, vacuum installation

Введение. Возрождение интереса к стратостатам и дирижаблям для мониторинга окружающей среды, телекоммуникаций и транспортировки грузов акту-

ализирует задачу создания надежных оболочек [1, 2]. Ключевым требованием к материалу оболочки является крайне низкая газопроницаемость для удержания подъемного газа (гелия или водорода) и предотвращения проникновения атмосферных газов и влаги. Работа в стратосфере сопряжена с экстремальными условиями: низкое давление (5–10 кПа), температуры до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, УФ-излучение, что может привести к деградации материала и росту проницаемости.

Материалы и методы. Существующие методы часто не учитывают комплексное воздействие внешних факторов. Целью данной работы является разработка экспериментальной установки, позволяющей определять газопроницаемость современных композитов в условиях, максимально приближенных к реальным.

Оболочка стратостата является критическим элементом, определяющим его эффективность и безопасность. Она должна обладать малой удельной массой, высокой механической прочностью на разрыв, абсолютной газонепроницаемостью для легких газов, устойчивостью к УФ-излучению, озону и экстремальным температурным циклам, низкой дегазацией в вакууме.

Ткане-пленочные материалы (ламинаты) — это многослойные структуры, сочетающие текстильную основу (полиэстер, нейлон, арамид) и газобарьерные полимерные пленки (полиуретан, PTFE, полиимид). Ткань обеспечивает механическую прочность, а пленка — герметичность. Основные применения: оболочки стратостатов и дирижаблей, надувные модули космических аппаратов, защитная одежда, гибкая электроника, мембранные конструкции. Для вакуумных и криогенных применений ключевыми являются свойства: крайне низкая газопроницаемость, радиационная и термическая стойкость, минимальная дегазация.

Газопроницаемость — свойство материала пропускать газы при перепаде давления. Различают три механизма газопроницаемости: диффузионный поток (в беспористых пленках); молекулярная эффузия (в пористых материалах с мелкими порами), ламинарный поток (в крупнопористых материалах) [3].

Существует несколько методов измерения газопроницаемости. Объемометрический метод: измерение объема газа, прошедшего через образец. Манометрический метод: регистрация изменения давления во времени. Методы стационарной/нестационарной фильтрации: для пористых сред. Масс-спектрометрический метод: высокоточное детектирование сверхмалых потоков газа (например, в криогенных условиях) [4–6].

Результаты. Разработанная установка (рис. 1) предназначена для измерения газопроницаемости в условиях стратосферы объемометрическим методом. Вакуумная камера состоит из двух идентичных камер, изготовленных из нержавеющей стали. Камеры соединяются фланцами ISO-160, между которыми герметично зажимается исследуемый образец материала. В качестве тестовых газов используются баллоны с гелием (He) и водородом (H_2). Аналитический блок включает в себя масс-спектрометр с турбомолекулярным насосом для детектирования сверхмалых потоков газа, спиральный насос. Испытание проводится в термобарокамере для охлаждения всего испытательного узла до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

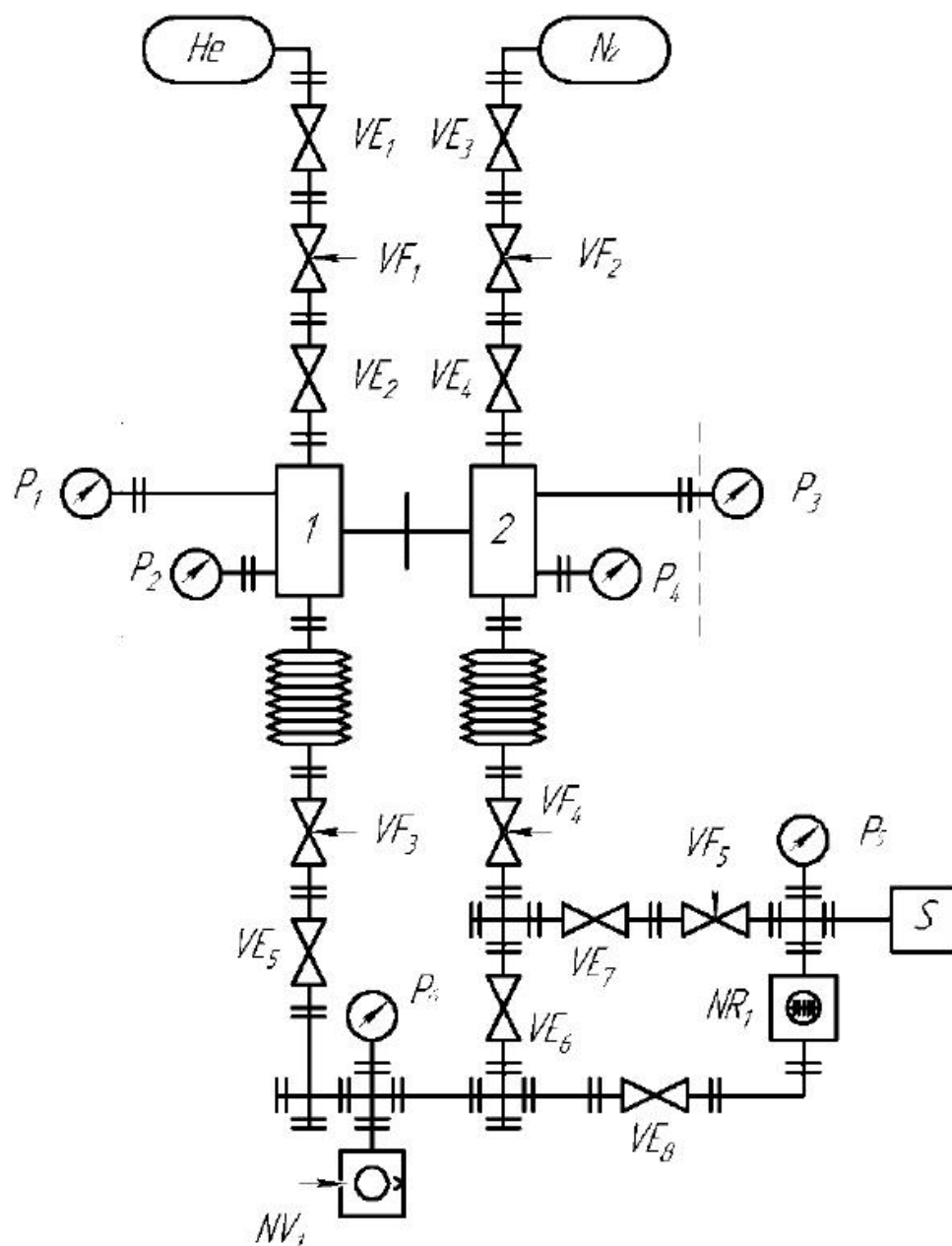


Рис. 1. He — газовый баллон с гелием; N₂ — газовый баллон с азотом; VE₁₋₄ — игольчатый вентиль; VF₁₋₅ — игольчатый нагнетатель; 1, 2 — вакуумная камера; P₁, P₃, P₅ — широкодиапазонный вакуумметр; P₂, P₄ — мембранно-емкостной датчик типа Баратрон; VE₅₋₈ — электромагнитный клапан; P₆ — вакуумметр; NV₁ — спиральный насос; NR₁ — турбомолекулярный насос; S — масс-спектрометр

Образец материала устанавливается между двумя вакуумными камерами. Сборка помещается в термобарокамеру, где температура снижается и стабилизируется на уровне $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. В камерах независимо создается вакуум. В одной камере давление устанавливается на уровне 6 кПа, в другой — 5,5 кПа, создавая перепад в 0,5 кПа. Камера с более высоким давлением заполняется гелием. Масс-спектрометр, подключенный к камере с низким давлением, непрерывно отслеживает появление гелия, прошедшего через материал. По скорости роста концентрации гелия рассчитывается удельная газопроницаемость материала для заданных условий. Модель установки показана на рис. 2.

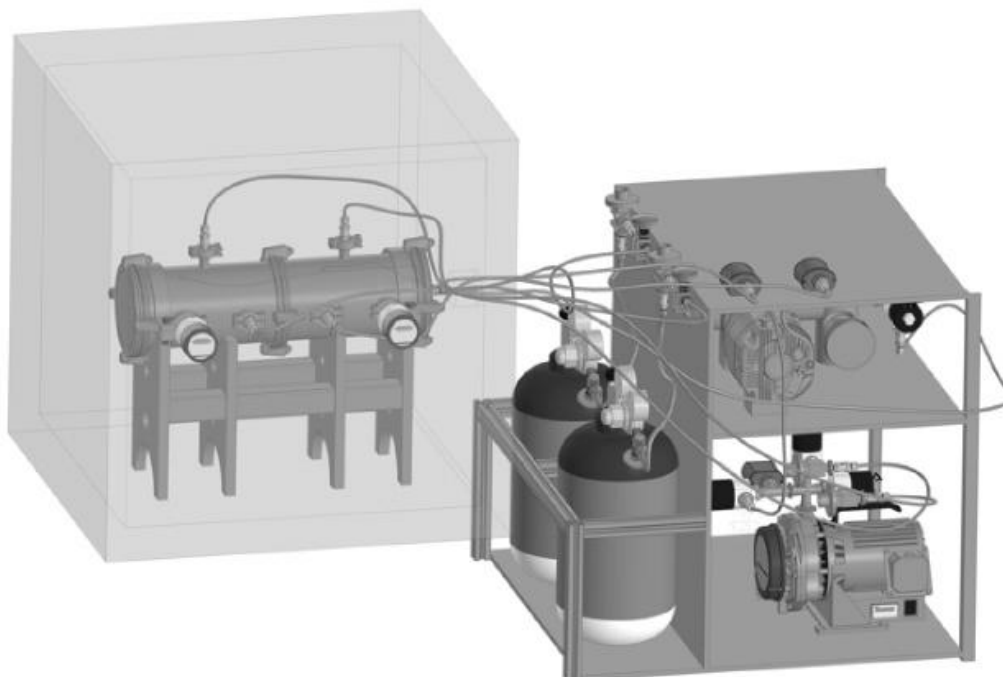


Рис. 2. Модель установки для оценки удельной газопроницаемости ткане-пленочных материалов

Заключение. В работе разработана и описана вакуумно-аналитическая установка, позволяющая проводить комплексные испытания ткане-пленочных материалов на газопроницаемость в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации в стратосфере ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5–10 кПа). Подбран состав измерительного оборудования, проведена оценка погрешностей. Установка является научно-технической базой для испытаний и отбора перспективных материалов для аэрокосмической отрасли.

Список источников

- [1] *На пути в космос. Стратостаты.* URL: <https://habr.com/ru/articles/388917/> (дата обращения 15.04.2025).
- [2] *Стратосферные аэростаты.* URL: <https://medvedius.ru/proekty/materialy/dirizhabli/stratosfernye-aerostaty-perspektivnaya-tekhnologiya> (дата обращения 15.04.2025).
- [3] *Газопроницаемость.* URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/007/999.htm> (дата обращения 22.04.2025).
- [4] *Стенд N-500 для определения газопроницаемости пленок манометрическим методом.* URL: https://granat-e.ru/stend_n-500.html (дата обращения 22.04.2025).
- [5] *Прибор для определения абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации «ПИК-ПСФ».* URL: <https://geologika.ru/product/pik-psf/> (дата обращения 24.04.2025).
- [6] Житников Ю.З., Иванов А.Н., Матросова Ю.Н., Матросов А.Е. *Способ определения проницаемости и пористости материалов.* Патент № RU 2275617 C2 РФ. Ковров, 2005.