

УДК 620.197

# Исследования газопроницаемости кварцевой керамики для прогнозирования герметичности элементов конструкций авиационного назначения

А.В. Терехин<sup>1</sup>, М.Ю. Русин<sup>1,2</sup>, С.В. Маслов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Studying the quartz ceramics gas permeability to forecast tightness of the design elements in aviation

A.V. Terekhin<sup>1</sup>, M.Yu. Rusin<sup>1,2</sup>, S.V. Maslov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

К изделиям из пористой кварцевой керамики предъявляются достаточно жесткие требования по сохранению герметичности. Приведены результаты исследований газопроницаемости пористой кварцевой керамики, широко используемой в теплонагруженных элементах конструкций авиационного назначения. Для проведения экспериментальной части исследований разработана и создана лабораторная установка, позволяющая определять коэффициент газопроницаемости исследуемого материала в диапазоне  $1 \cdot 10^{-20} \dots 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ . С применением стандартных методов получены экспериментальные данные о газопроницаемости кварцевой керамики, в том числе с учетом эффекта проскальзывания газа в капиллярах ее порового пространства (эффекта Клинкенберга). Выполнена верификация полученных данных на конструкции, изготовленной из кварцевой керамики. Полученные результаты можно использовать при проектировании и разработке элементов высоконагруженных конструкций из кварцевой керамики для прогнозирования падения давления во внутренних объемах, а также при формулировании требований к герметичности конструкций авиационного назначения.

EDN: NHMNJD, <https://elibrary/hhmnjd>

**Ключевые слова:** газопроницаемость кварцевой керамики, коэффициент газопроницаемости, герметичность конструкции, эффект Клинкенберга

Products made from the porous quartz ceramics are subjected to rather stringent requirements in maintaining their airtightness. The paper presents results of studying gas permeability of the porous quartz ceramics, which are widely used in the thermally loaded aviation structure components. To conduct the experimental portion of the study, a unique laboratory setup was developed and constructed making it possible to determine the gas permeability coefficient of the studied material in the range of  $1 \cdot 10^{-20} \dots 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ . Using the standard methods, allowed obtaining experimental data on the quartz ceramics gas permeability taking into consideration the gas slippage effect in the ceramic pore space capillaries (Klinkenberg effect). The obtained data were verified using a structure made of the quartz ceramics. The obtained results could be used in design and development of the highly loaded quartz

ceramic structures to forecast pressure drops in the internal volumes, as well as in formulating airtightness requirements for the aviation structures.

EDN: HHMNJD, <https://elibrary/hhmnjd>

**Keywords:** quartz ceramic gas permeability, gas permeability coefficient, structure airtightness, Klinkenberg effect

Кварцевая керамика (КК) — один из основных конструкционных материалов, применяемых для изготовления теплонагруженных элементов авиационного назначения [1, 2]. Благодаря радиопрозрачности, низкой теплопроводности, термостойкости, стабильному и низкому тепловому коэффициенту линейного расширения КК получила широкое применение в наиболее нагруженных конструкциях, воспринимающих на себя самые высокие тепловые и силовые нагрузки [3].

Температура внешней поверхности высоконагруженных изделий, изготовленных из КК, в процессе эксплуатации может меняться в достаточно широких пределах (от минус 65 до 1200 °С и более). Помимо требований по сохранению в пределах допустимых норм радиотехнических и прочностных характеристик к керамическим элементам конструкции предъявляются достаточно жесткие требования по сохранению герметичности в процессе эксплуатации. Зачастую относительное снижение давления во внутренней полости элемента конструкции на протяжении полета летательного аппарата не должно превышать 5...10 %, что в зависимости от внутреннего объема конструкции требует ограничения максимального расхода потока газа через всю поверхность элемента на уровне  $1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

Указанные требования по герметичности элементов конструкции из материалов на основе КК, неотъемлемой частью структуры которой является поровое пространство (ПП) [3] (открытая пористость КК может достигать 7...11 %), на практике обеспечиваются двумя основными способами или их совмещением:

- нанесением на поверхность керамических элементов специальных лакокрасочных (ЛКП) или влагозащитных покрытий (ВЗП) на органической или кремнийорганической основе [3], температура эксплуатации которых достигает 300...350 °С (кратковременно);
- заполнением (объемным или поверхностным) открытого ПП КК кремнийорганическими составами (растворами) [3], температура начала процесса термодеструкции которых лежит в пределах 300...350 °С.

Оба способа позволяют достаточно эффективно решать задачу обеспечения герметичности конструкции в процессе производства, хранения и транспортирования. Однако температура поверхности высоконагруженных элементов из КК в процессе эксплуатации существенно превышает рабочий диапазон температур как применяемых ЛКП и ВЗП, так и упрочняющих пропитывающих составов. В процессе эксплуатации происходит активная термическая деструкция этих материалов, и герметичность керамической конструкции во многом зависит от газопроницаемости ее материала.

В таких условиях для прогнозирования герметичности конструкции из КК на этапах его проектирования, разработки и наземной отработки необходимо иметь достоверные экспериментальные данные о свойствах материала, определяющих его газопроницаемость. Имеющиеся в настоящее время немногочисленные литературные данные по газопроницаемости высокотемпературной КК, полученные еще в 1970-х годах прошлого века [3–5], противоречивы, а ввиду произошедших со временем изменений в составе КК и технологии изготовления изделий из нее, требуют актуализации.

Параметром, характеризующим степень герметичности материала к проникновению газа через его структуру, является коэффициент газопроницаемости  $k_g$ , зависящий от свойств материала и определяемый геометрическими параметрами ПП, а также свойствами фильтруемого газа [6–11].

Для экспериментального определения коэффициента газопроницаемости огнеупорных изделий с открытой пористостью более 5 % существует стандартизированный метод, изложенный в ГОСТ 11573–98, в основе которого лежит предположение о линейном законе фильтрации воздуха через исследуемый материал. При этом предполагается, что коэффициент газопроницаемости материала является постоянной величиной, не зависящей от градиента давления (закон Дарси).

Однако результаты отдельных исследований [12–14] и встречающиеся в литературе [3,

5] данные о зависимости коэффициента газопроницаемости КК от градиента давления показывают, что для материалов с низкой проницаемостью (особенно при низком градиенте давления) характерно отклонение закона фильтрации газовых флюидов от линейного, во многом обусловленное проявлением эффекта проскальзывания газа в капиллярах ПП материала, названного эффектом Клинкенберга [12].

Цель работы — проведение дополнительных исследований по определению коэффициента газопроницаемости КК, применяемой в высоконагруженных конструкциях авиационного назначения.

Для проведения экспериментальных исследований фильтрации газа (воздуха) через пористую КК разработана и создана лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 1.

В состав лабораторной установки входят: приспособление для монтажа исследуемого образца материала 8; масс-спектрометрический течеискатель 14 для определения герметичности элементов и соединений установки; датчики абсолютного давления 6, 9 с диапазоном измерения 0...1 МПа (0...10 кгс/см<sup>2</sup>); газовые расходомеры 2, 3 с минимальным порогом измерения расхода газа 0,1 см<sup>3</sup>/мин; клапаны давления 11–13 и комплект арматуры

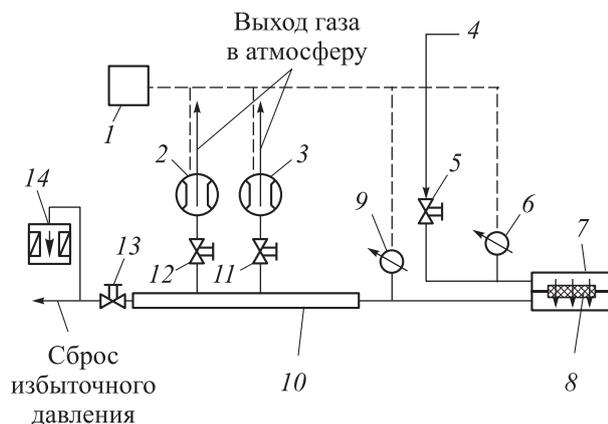


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования процессов фильтрации воздуха в пористых керамических материалах:

- 1 — программируемый контроллер; 2, 3 — расходомеры;
- 4 — центральная магистраль для подачи сжатого воздуха или баллон с избыточным давлением воздуха;
- 5 — редуктор системы подачи газа от источника;
- 6, 9 — датчики абсолютного давления;
- 7 — приспособление для монтажа исследуемого образца;
- 8 — образец исследуемого материала;
- 10 — компенсационный объем; 11–13 — клапаны давления; 14 — масс-спектрометрический течеискатель

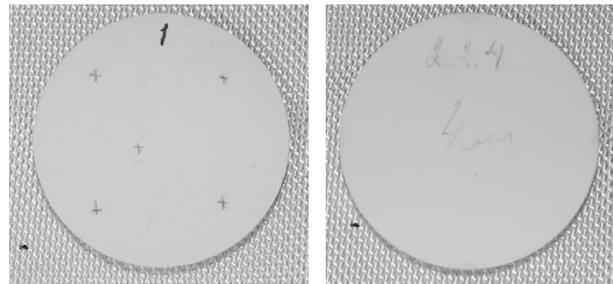


Рис. 2. Внешний вид образцов КК без пропитки ПП (а) и с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 (б)

для соединения элементов лабораторного комплекса; программируемый контроллер 1 для управления режимом испытаний и регистрации получаемых данных.

Лабораторная установка позволяет определять коэффициенты газопроницаемости пористых конструкционных материалов  $k_f$  в диапазоне  $1,0 \cdot 10^{-20} \dots 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

Экспериментальные исследования проводили на образцах КК НИАСИТ в виде дисков (рис. 2) диаметром 49,5 мм и толщиной 4 мм как без пропитки ПП, так и с его пропиткой раствором полиметилфенилспироксидана в ацетоне (далее продукт МФСС-8).

На первом этапе исследований (согласно ГОСТ 11573–98) измеряли объемный расход воздуха  $Q$  через каждый образец при различных значениях градиента давления  $\Delta p$  в диапазоне 50...200 кПа с шагом 50 кПа. Выбор диапазона градиента давления обусловлен условиями эксплуатации конкретных изделий.

По полученным экспериментальным данным построены графики, приведенные на рис. 3. Видно, что зависимость объемного расхода воздуха  $Q$  от градиента давления  $\Delta p$  с учетом погрешности измерения близка к линейной, что свидетельствует о возможности применения закона Дарси для описания процесса фильтрации воздуха через пропитанную и непропитанную КК в исследуемом диапазоне  $\Delta p$ . При доверительном интервале  $\alpha = 0,95$  % относительная погрешность измерения расхода воздуха  $\delta Q$  КК с пропиткой составила 9,05 %, а без пропитки — 9,01 %.

По полученным данным согласно методу, описанному в ГОСТ 11573–98, при градиенте давления, характерном для эксплуатации элемента конструкции летательного аппарата (максимальное значение которого достигает 100 кПа) рассчитывали коэффициент газопроницаемости КК

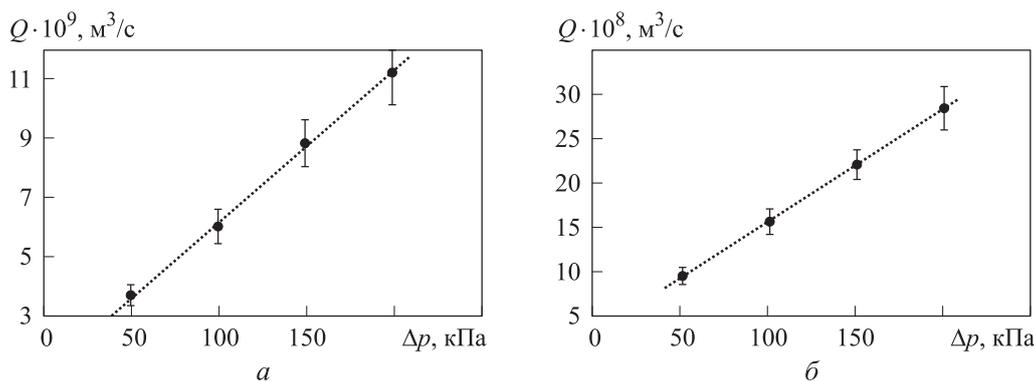


Рис. 3. Зависимости объемного расхода воздуха  $Q$  через КК НИАСИТ с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 (а) и без пропитки ПП (б) от градиента давления  $\Delta p$

$$k_r = \frac{Q\mu h}{\Delta p S}, \text{ м}^2,$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $h$  — толщина образца, м;  $S$  — эффективная площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Расчетные значения коэффициента газопроницаемости КК НИАСИТ приведены в табл. 1.

Поскольку ПП материалов, как правило, имеет сложную и случайную конфигурацию, теоретическое описание процессов фильтрации газа через пористые материалы весьма затруднено [6]. С учетом полученных значений коэффициента газопроницаемости  $k_r$  и данных, приведенных в работах [4, 12, 15], средний размер капилляров КК НИАСИТ лежит в диапазоне  $3,20 \cdot 10^{-4} \dots 2,74 \cdot 10^{-7}$  м. Результаты расчета среднего размера капилляров  $r_{cp}$  КК НИАСИТ приведены в табл. 2, где  $A$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Результаты микроструктурного анализа КК, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, показаны на рис. 4. Видно,

что распределение зерна материала крупной и мелкой фракций носит случайный характер и неравномерно по объему, что приводит к образованию ПП сложной конфигурации, способствующей проявлению нелинейных эффектов в процессе фильтрации газа, к которым относятся и эффект Клинкенберга [7–9].

На втором этапе исследований проведены расчеты соответствующей поправки (коэффициента Клинкенберга) для оценки влияния эффекта Клинкенберга на полученные данные по газопроницаемости КК.

Расчет коэффициента скольжения  $b$  выполнен согласно стандартному методу, изложенному в ГОСТ 26450.2–85 для учета отклонений от закона Дарси, влияющих на определение проницаемости в насыщенных горных породах:

$$b = \frac{1}{k_{abc}} \left[ \frac{\Delta k_r}{\Delta(1/p_{cp})} \right],$$

где  $k_{abc}$  — коэффициент абсолютной газопроницаемости, м<sup>2</sup>;  $p_{cp}$  — среднее давление в образце, Па.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициента газопроницаемости КК НИАСИТ

| Материал                                  | Открытая пористость П, % | Избыточное давление воздуха на входе в образец $p$ , кПа | Объемный расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /с | Коэффициент газопроницаемости $k_r$ , м <sup>2</sup> |
|---|--------------------------|--|---|--|
| КК НИАСИТ с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 | 0,03                     | 50   | $3,67 \cdot 10^{-9}$                            | $3,74 \cdot 10^{-18}$                                |
|   |                          | 100  | $6,00 \cdot 10^{-9}$                            | $3,06 \cdot 10^{-18}$                                |
|   |                          | 150  | $8,83 \cdot 10^{-9}$                            | $3,00 \cdot 10^{-18}$                                |
|   |                          | 200  | $1,12 \cdot 10^{-8}$                            | $2,85 \cdot 10^{-18}$                                |
| КК НИАСИТ без пропитки ПП                 | 10,2                     | 50   | $9,33 \cdot 10^{-8}$                            | $9,52 \cdot 10^{-17}$                                |
|   |                          | 100  | $1,55 \cdot 10^{-7}$                            | $7,90 \cdot 10^{-17}$                                |
|   |                          | 150  | $2,18 \cdot 10^{-7}$                            | $7,42 \cdot 10^{-17}$                                |
|   |                          | 200  | $2,83 \cdot 10^{-7}$                            | $7,22 \cdot 10^{-17}$                                |

Таблица 2

**Значения среднего размера капилляров КК  
НИАСИТ**

| Источник данных | Формула для расчета $r_{cp}$                                   | Средний размер капилляров, м |                      |
|-----------------|--|------------------------------|----------------------|
|                 |  | КК с пропиткой ПП МФСС-8     | КК без пропитки ПП   |
| [4]             | $r_{cp} = 416 \sqrt{\frac{k_r}{\Pi}}$                          | $3,94 \cdot 10^{-5}$         | $1,20 \cdot 10^{-5}$ |
| [12]            | $r_{cp} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_r}{\Pi^3}}$                | $3,20 \cdot 10^{-4}$         | $2,74 \cdot 10^{-7}$ |
| [15]            | $r_{cp} = \frac{1}{2} 56,6 \left( \frac{k_r}{A} \right)^{1/2}$ | $5,36 \cdot 10^{-6}$         | $1,63 \cdot 10^{-6}$ |

Коэффициент абсолютной газопроницаемости  $k_{абс}$  и коэффициент газопроницаемости  $k_r$  связаны соотношением

$$k_{абс} = \frac{k_r}{1 - b/p_{cp}}$$

Непосредственное измерение среднего давления  $p_{cp}$  выполнено путем определения проницаемости при различных значениях  $p_{cp}$  и последующего построения зависимости  $k_r = f(1/p_{cp})$ . Значение коэффициента абсолютной газопроницаемости  $k_{абс}$  находили экстраполяцией зависимости при  $1/p_{cp} > 0$  (рис. 5).

Результаты расчета коэффициента абсолютной газопроницаемости  $k_{абс}$  и коэффициента скольжения  $b$  приведены в табл. 3.

Для сравнения полученных (по ГОСТ 26450.2–85) значений  $k_{абс}$  и  $b$  выполнен расчет этих параметров альтернативным методом, описанным в работе [12]. Коэффициент абсолютной газопроницаемости рассчитывали по формуле

$$k_{абс} = \frac{k_r}{1 + b_1/\bar{p}}$$

где  $b_1$  — коэффициент скольжения (Клинкенберга), Па;  $\bar{p}$  — среднее давление в образце, Па.

Коэффициент Клинкенберга определяли с учетом открытой пористости образца по выражению

$$b_1 = 0,5 p_0 \left( \frac{\lambda^2 \Pi}{k_r} \right)^{0,3}$$

Здесь  $p_0$  — абсолютное давление воздуха на выходе из образца, равное атмосферному, Па;

$\lambda$  — длина свободного пробега молекулы газа в пористой среде, м,

$$\lambda = \frac{\mu}{p - p_0} \sqrt{\frac{\pi R_g T}{2M}},$$

где  $R_g$  — универсальная газовая постоянная,  $R_g = 8,3144$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $T$  — температура газа, °С;  $M$  — молекулярная масса воздуха,  $M = 2,897 \cdot 10^{-2}$  кг·моль<sup>-1</sup>.

Результаты расчета указаны в табл. 3.

Так как газопроницаемость материала является функцией длины свободного пробега молекулы газа в нем, она зависит и от факторов, влияющих на  $\lambda$  — давления, температуры газа и его типа (окислители, нейтральные, горючие) [12]. При малом градиенте давления в низкопроницаемой пористой среде степень влияния эффекта Клинкенберга газа характеризуется числом Кнудсена

$$Kn = \lambda \sqrt{\frac{\Pi^3}{k_{абс}}}$$

При этом необходимо учитывать, что ввиду сложной конфигурации ПП КК поры и капилляры в материале расположены случайным образом с неравномерной плотностью распределения размеров капилляров по объему материала. В связи с этим получаемые расчетным путем значения характерного размера капилляров в материале можно использовать только для оценки его проницаемости.

Чтобы оценить влияние коэффициентов скольжения  $b$  и  $b_1$  на возможное отклонение от линейного закона Дарси определяли разницу между коэффициентом газопроницаемости  $k_r$  и коэффициентом абсолютной газопроницаемости  $k_{абс}$

$$\delta_k = \left| \frac{k_r - k_{абс}}{k_r} \right| \cdot 100 \%$$

Как следует из табл. 3, разница между коэффициентами  $k_r$  и  $k_{абс}$  для КК с пропиткой ПП и без пропитки ПП, рассчитанными согласно ГОСТ 26450.2–85, составляет 49,1 и 50,1 %, а вычисленными альтернативным методом [12] — 26,2 и 11,8 % соответственно. Согласно ГОСТ 26450.2–85, относительная погрешность измерения коэффициента абсолютной газопроницаемости ( $\delta Q + \delta p + \delta S + \delta \mu$ ) для КК с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 и без пропитки ПП составляет 12 %.

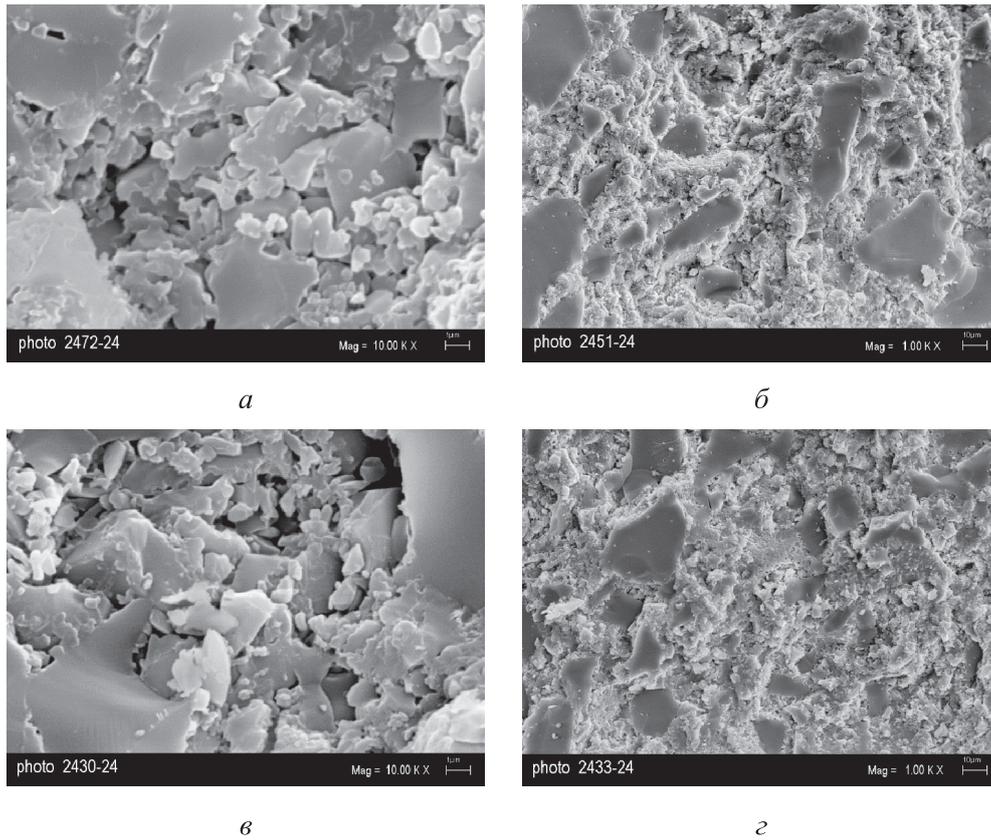


Рис. 4. Микроструктура образцов КК НИАСИТ с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 (а, б) и без пропитки ПП (в, г)

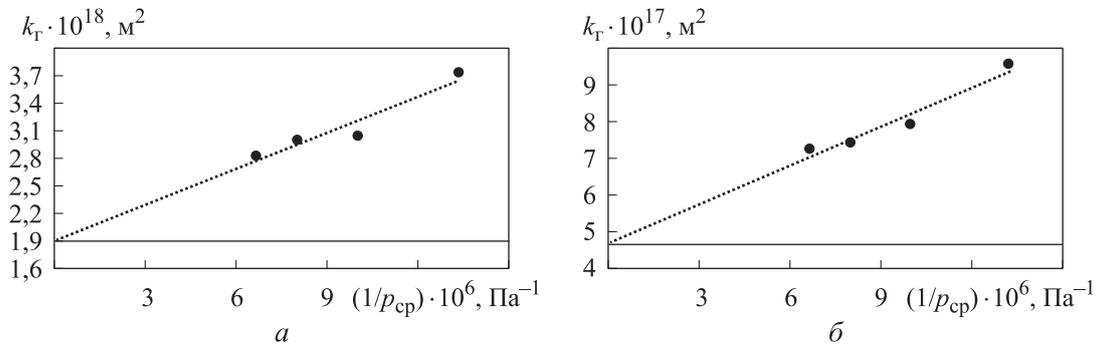


Рис. 5. Результаты определения коэффициента абсолютной газопроницаемости  $k_{абс}$  КК НИАСИТ с пропиткой ПП продуктом МФСС-8 (а) и без пропитки ПП (б)

Таблица 3

Результаты расчета параметров различными методами

| Материал            | П, %  | $k_r, м^2$                                  | $k_{абс}, м^2$                              | $b$               | $b_1$             | $\delta_k, \%$ |
|---------------------|-------|---|---|-------------------|-------------------|----------------|
| НИАСИТ с пропиткой  | 0,03  | $3,74 \cdot 10^{-18} / 3,74 \cdot 10^{-18}$ | $1,90 \cdot 10^{-18} / 2,76 \cdot 10^{-18}$ | $1,48 \cdot 10^5$ | $2,66 \cdot 10^4$ | 49,1/26,2      |
| НИАСИТ без пропитки | 10,20 | $9,52 \cdot 10^{-17} / 9,52 \cdot 10^{-17}$ | $4,75 \cdot 10^{-17} / 8,39 \cdot 10^{-17}$ | $1,50 \cdot 10^5$ | $1,01 \cdot 10^4$ | 50,1/11,8      |

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения, рассчитанные согласно ГОСТ 26450.2-85, в знаменателе — альтернативным методом [12].

Таким образом, экспериментальным путем установлены значения коэффициента абсолютной газопроницаемости КК НИАСИТ (с про-

питкой ПП и без нее) и проведена оценка поправки на учет эффекта Клинкенберга, исходя из которой можно сделать вывод, что эффект

Клинкенберга в этой КК проявляется, но его вклад в наблюдаемые процессы при фильтрации воздуха незначителен и составляет менее 20 % при расчете коэффициентов  $k_r$  и  $k_{абс}$  согласно [12].

Для верификации полученных данных проведены работы по определению изменения давления в элементе конструкции из КК без пропитки ПП, имеющего форму полой оболочки. Во внутренней полости оболочки объемом  $V = 0,005 \text{ м}^3$  и средней толщиной стенки  $h = 7 \text{ мм}$  абсолютное давление снижалось до  $p_0 = 5 \text{ кПа}$  (максимально достижимое давление в конструкции из КК без пропитки ПП с площадью внешней поверхности  $S = 0,175 \text{ м}^2$ ) для создания градиента по стенке конструкции  $\Delta p = 95 \text{ кПа}$  с последующим отсечением вакуумным клапаном ее внутреннего объема от атмосферы, выдержкой и измерением абсолютного давления во внутреннем объеме (рис. 6).

Анализ полученных результатов показал, что за время выдержки  $t = 300 \text{ с}$  при  $\Delta p = 95 \text{ кПа}$  давление в конструкции повысилось на 40 кПа (рис. 7), что соответствует объемному расходу воздуха через стенку конструкции площадью  $S = 0,175 \text{ м}^2$ , равному  $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ .

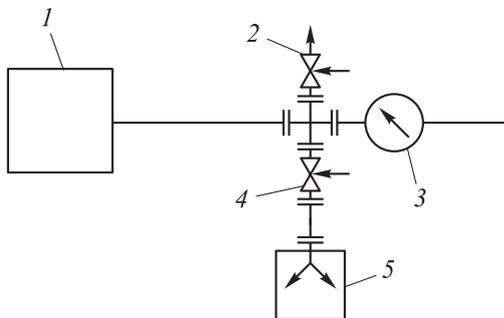


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 — изделие из КК; 2, 4 — вакуумные клапаны; 3 — датчик абсолютного давления; 5 — вакуумный насос

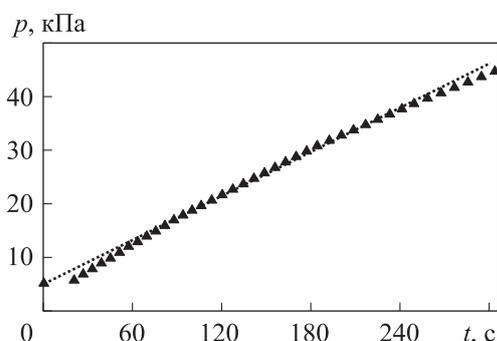


Рис. 7. Зависимость абсолютного давления  $p$  во внутреннем объеме конструкции из КК от времени выдержки  $t$

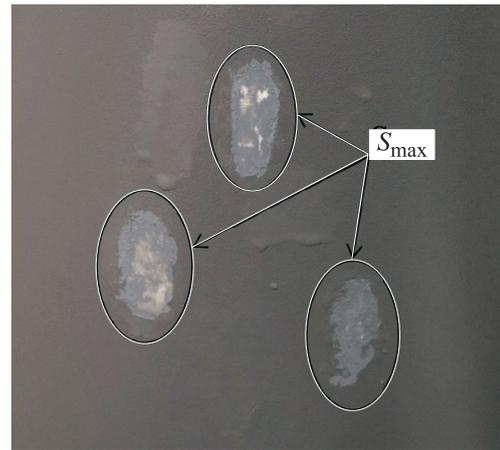


Рис. 8. Картина нарушения покрытия на поверхности высоконагруженной конструкции авиационного назначения из КК

В этом случае объемный расход воздуха при допущении о постоянстве градиента давления соответствует среднему по фильтруемой площади абсолютному коэффициенту газопроницаемости КК  $k_{абс} = 2,1 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ , что с учетом погрешности измерения согласуется с результатами, полученными ранее на образцах (см. табл. 2).

Также при заданных требованиях к необходимому уровню герметичности элемента конструкции (максимальному объемному расходу воздуха через ее поверхность  $Q_{max}$ ), при известном коэффициенте газопроницаемости  $k_{абс}$  и законе фильтрации газа, а также при выполнении условия  $k_{абс} \ll k_{г.п}$  (где  $k_{г.п}$  — коэффициент газопроницаемости покрытия), можно оценить максимально допустимую площадь нарушения покрытия (рис. 8)

$$S_{max} = \frac{Q_{кр} \mu h}{\Delta p k_{абс}}$$

## Выводы

1. Получены актуальные данные о газопроницаемости КК, в том числе проведена оценка влияния эффекта Клинкенберга в капиллярах ПП КК НИАСИТ на коэффициент газопроницаемости, которые можно использовать для выполнения следующих работ:

- проектирование и разработка высоконагруженных элементов конструкций авиационного назначения, изготавливаемых из пористой КК, прогнозирование эксплуатационного давления во внутренних объемах конструкций в процессе эксплуатации;

- формулирование требований к допустимому уровню герметичности проектируемых высоконагруженных элементов конструкций авиационного назначения на заданном уровне объемного расхода через элемент конструкции для конкретного значения проницаемости его материала;

- обоснование внесения изменений в геометрические параметры конструкции (толщину стенки, объем внутренней полости, площадь

поверхности) для достижения заданных требований по ее герметичности в процессе эксплуатации.

2. Результаты проведенных исследований газопроницаемости КК позволяют более обоснованно формулировать требования к качеству наносимых покрытий, обеспечивающих герметичность высоконагруженных элементов конструкций авиационного назначения в процессе эксплуатации.

## Литература

- [1] Русин М.Ю. *Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 63 с.
- [2] Харитонов Д.В., Тычинская М.С., Анашкина А.А. и др. *Керамические материалы для авиации и космоса*. Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022. 120 с.
- [3] Пивинский Е.И., Суздальцев Ю.Е. *Кварцевая керамика и огнеупоры*. Т. 2. *Материалы, их свойства и области применения*. Москва, Теплоэнергетик, 2008. 464 с.
- [4] Попильский Р.Я., Адушкин Л.Е., Пивинский Ю.Е. и др. Исследование некоторых свойств кварцевой керамики в широком интервале температур. *Огнеупоры*, 1971, № 4, с. 45–51.
- [5] Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г. *Кварцевая керамика*. Москва, Металлургия, 1974. 264 с.
- [6] Леонтьев Н.Е. *Основы теории фильтрации*. Москва, МАКС Пресс, 2017. 88 с.
- [7] Liu H., Xu Y. Gas permeability measurement in porous graphite under steady-state flow. *Mater. Res. Express*, 2022, vol. 9, no. 2, art. 025603, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac50d7>
- [8] Molisani A.L., de Mattos F.N., Caldeira L. Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported membrane. *Ceramica*, 2022, vol. 68, no. 385, pp. 46–51, doi: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>
- [9] Wałowski G. Assessment of gas permeability coefficient of porous materials. *J. Sustain. Min.*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 55–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.08.001>
- [10] Han F., Zhong Z., Yang Y. et al. High gas permeability of SiC porous ceramics reinforced by mullite fibers. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2016, vol. 36, no. 16, pp. 3909–3917, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.06.048>
- [11] Ding S., Zeng Y.P., Jiang D. Gas permeability behavior of mullite-bonded porous silicon carbide ceramics. *J. Mater. Sci.*, 2007, vol. 42, no. 17, pp. 7171–7175, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1577-y>
- [12] Гаюбов А.Т. *Анализ влияния нелинейных эффектов на течение флюидов в пористых средах*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2021. 112 с.
- [13] Троицкий В.М. Феноменологический подход к анализу экспериментальных данных о газопроницаемости в пористых средах. Истинная причина эффекта Клинкенберга. *Вести газовой науки*, 2017, № 2, с. 110–124.
- [14] Собина Е.П. *Совершенствование системы метрологического обеспечения средств измерения пористости и проницаемости твердых веществ и материалов*. Дисс. ... док. тех. наук. Екатеринбург, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2020. 411 с.
- [15] Беркман А.С., Мельникова И.Г. *Пористая проницаемая керамика*. Ленинград, Стройиздат, 1969. 141 с.

## References

- [1] Rusin M.Yu. *Proektirovanie golovnykh obtekateley raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov* [Design of rocket head fairings from ceramic and composite materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 63 p. (In Russ.).

- [2] Kharitonov D.V., Tychinskaya M.S., Anashkina A.A. et al. *Keramicheskie materialy dlya aviatsii i kosmosa* [Ceramic materials for aviation and space]. Moscow, RKhTU im. D.I. Mendeleeva Publ., 2022. 120 p. (In Russ.).
- [3] Pivinskiy E.I., Suzdaltsev Yu.E. *Kvartsevaya keramika i ogneupory*. T. 2. *Materialy, ikh svoystva i oblasti primeneniya* [Quartz ceramics and refractories. Vol. 2. Materials, their properties and applications]. Moscow, Teploenergetik Publ., 2008. 464 p. (In Russ.).
- [4] Popilskiy R.Ya., Adushkin L.E., Pivinskiy Yu.E. et al. Investigation of some properties of quartz ceramics in a wide temperature range. *Ogneupory*, 1971, no. 4, pp. 45–51. (In Russ.).
- [5] Pivinskiy Yu.E., Romashin A.G. *Kvartsevaya keramika* [Quartz ceramics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 264 p. (In Russ.).
- [6] Leontyev N.E. *Osnovy teorii filtratsii* [Fundamentals of filtration theory]. Moscow, MAKS Press Publ., 2017. 88 p. (In Russ.).
- [7] Liu H., Xu Y. Gas permeability measurement in porous graphite under steady-state flow. *Mater. Res. Express*, 2022, vol. 9, no. 2, art. 025603, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac50d7>
- [8] Molisani A.L., de Mattos F.N., Caldeira L. Gas permeability and compressive strength evaluation of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> supported membrane. *Ceramica*, 2022, vol. 68, no. 385, pp. 46–51, doi: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853204>
- [9] Wałowski G. Assessment of gas permeability coefficient of porous materials. *J. Sustain. Min.*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 55–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2017.08.001>
- [10] Han F., Zhong Z., Yang Y. et al. High gas permeability of SiC porous ceramics reinforced by mullite fibers. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2016, vol. 36, no. 16, pp. 3909–3917, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.06.048>
- [11] Ding S., Zeng Y.P., Jiang D. Gas permeability behavior of mullite-bonded porous silicon carbide ceramics. *J. Mater. Sci.*, 2007, vol. 42, no. 17, pp. 7171–7175, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1577-y>
- [12] Gayubov A.T. *Analiz vliyaniya nelineynykh effektov na techenie flyuidov v poristyykh sredakh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Analysis of the influence of nonlinear effects on fluid flow in porous media. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2021. 112 p. (In Russ.).
- [13] Troitskiy V.M. Phenomenological approach to analysis of empirical data on gas permeability in porous media. A true reason for Klinkenberg's effect. *Vesti gazovoy nauki* [Gas Science Bulletin], 2017, no. 2, pp. 110–124. (In Russ.).
- [14] Sobina E.P. *Sovershenstvovanie sistemy metrologicheskogo obespecheniya sredstv izmereniya poristosti i pronitsaemosti tverdykh veshchestv i materialov*. Diss. dok. tekhn. nauk [Improvement of metrological support system for measuring instruments of porosity and permeability of solids and materials. Doc. tech. sci. diss.]. Ekaterinburg, VNIIM im. D.I. Mendeleeva Publ., 2020. 411 p. (In Russ.).
- [15] Berkman A.S., Melnikova I.G. *Poristaya pronitsaemaya keramika* [Porous permeable ceramics]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1969. 141 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.12.2024

## Информация об авторах

**ТЕРЕХИН Александр Васильевич** — кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: [info@technology.ru](mailto:info@technology.ru)).

## Information about the authors

**TEREKHIN Alexander Vasilyevich** — Candidate of Science (Eng.), Head of Scientific Research Laboratory. Obninsk Research and Production Enterprise Technology named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: [info@technology.ru](mailto:info@technology.ru)).

**РУСИН Михаил Юрьевич** — доктор технических наук, директор НПК, главный конструктор. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»; профессор. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: info@technologiya.ru).

**RUSIN Mikhail Yurievich** — Doctor of Science (Eng.), SPC Director, Chief Designer. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC; Professor. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: info@technologiya.ru).

**МАСЛОВ Сергей Владимирович** — аспирант, инженер второй категории научно-исследовательской лаборатории. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: info@technologiya.ru).

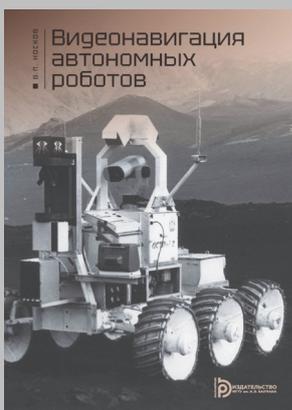
**MASLOV Sergey Vladimirovich** — Postgraduate, Engineer of the 2<sup>nd</sup> Category, Scientific Research Laboratory. Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: info@technologiya.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Терехин А.В., Русин М.Ю., Маслов С.В. Исследования газопроницаемости кварцевой керамики для прогнозирования герметичности элементов конструкций авиационного назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 128–137.

**Please cite this article in English as:**

Terekhin A.V., Rusin M.Yu., Maslov S.V. Studying the quartz ceramics gas permeability to forecast tightness of the design elements in aviation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 128–137.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие**

**«Видеонавигация автономных роботов»**

**Автор В.П. Носков**

Рассмотрены методы и алгоритмы формирования моделей внешних сред и определения координат объекта управления по данным бортовых систем технического зрения, обеспечивающие автоматическое планирование и отработку целенаправленных траекторий движения и являющиеся основой построения автономных средств управления робототехнических и мехатронных систем. Приведены программно-аппаратные средства основных подсистем автономной системы управления движением и результаты их работы в составе наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов в реальных условиях различных сред.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>