

# Анализ возможности попадания частиц износа истираемого покрытия лабиринтного уплотнения в маслосистему двигателя

Гаскаров А.В., Попова Д.Д., Самойленко Н.А.

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь

e-mail: samoylenko-na@avid.ru

В АО «ОДК-Авиадвигатель» было обнаружено, что причиной появления в газотурбинном двигателе сигнала «стружка в масле» может быть попадание частиц износа истираемого покрытия, используемого в межвальном лабиринтном уплотнении. Данный дефект приводит к загрязнению масляной системы и возможному попаданию частиц износа в опоры, что снижает ресурс подшипников. Для анализа этого дефекта был выполнен трехмерный газодинамический расчет течения воздуха в межвальной полости. По результатам расчетных работ определены причины попадания частиц износа истираемого покрытия в маслосистему, а также предложено мероприятие для устранения данного дефекта.

**Ключевые слова:** лабиринтное уплотнение, межвальное уплотнение, истираемое покрытие, маслосистема, моделирование движения частиц

## Analysis of the ingress possibility of wear particles from the labyrinth seal's abrasible coating into the engine oil system

Gaskarov A.V., Popova D.D., Samoylenko N.A.

JSC "UEC-Aviadvigatel", Perm

JSC "UEC-Aviadvigatel" discovered that the ingress of wear particles of the abrasible coating used in the inter-shaft labyrinth seal may be the cause of the "chips in oil" signal appearing in the gas turbine engine. This defect leads to contamination of the oil system and possible ingress of wear particles into the bearings, reducing their life. A three-dimensional gas-dynamic calculation of the air flow in the inter-shaft cavity was performed to analyze this defect. Causes for the ingress of abrasible coating's wear particles into the oil system were determined based on the calculation results, and the action was recommended to remedy this defect.

**Keywords:** labyrinth seal, inter-shaft seal, abrasible coating, oil system, particle motion simulation

### Введение

Для всех газотурбинных двигателей, вне зависимости от кинематической схемы и типа (авиационных, наземных, наземных как результата конверсии [1]), необходимо уплотнение масляных полостей опор. Как правило, с двух сторон масляных полостей стоят лабиринтные уплотнения, также происходит наддув опор воздухом [2]. Эффективность работы лабиринтного уплотнения напрямую зависит от радиального зазора между его фланцем и гребешками [3; 4]. Чтобы уменьшить монтажные радиальные зазоры в лабиринтных уплотнениях и

обеспечить их приработку без повреждения гребешков и фланца, используют истираемые покрытия, которые наносят на фланец лабиринтного уплотнения.

В АО «ОДК-Авиадвигатель» обнаружено, что причиной сигнала «стружка в масле» на двигателе может служить попадание частиц истираемого покрытия межвального лабиринтного уплотнения. На рис. 1 показан лабиринт, закрепленный на валу турбины низкого давления (ТНД), и истираемое покрытие, нанесенное на фланец, закрепленный на валу турбины высокого давления (ТВД). Подобная конструкция является типовой для двухвальных двигателей с роторами дискового типа,

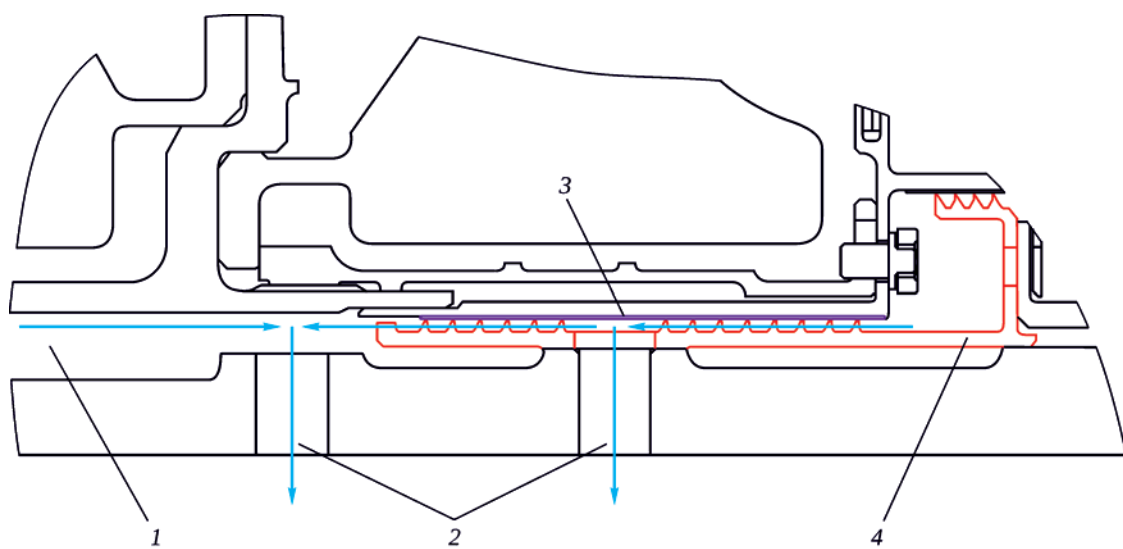


Рис. 1. Межвальное лабиринтное уплотнение, схема движения воздуха:

1 – межвальная полость; 2 – отверстия сброса; 3 – истираемое покрытие на фланце лабиринтного уплотнения; 4 – лабиринт

т.е. за межвальным лабиринтным уплотнением всегда следует межвальная полость, которая выходит к опоре компрессора низкого давления (КНД), следовательно, проблема попадания частиц истираемого покрытия в маслосистему может быть актуальной для многих двигателей. Также в целом лабиринтные уплотнения опор вне зависимости от типа двигателя (одновальный, двухвальный, трехвальный) так или иначе связаны с маслосистемой и системой суфлирования [5].

При врезании гребешков в истираемое покрытие могут происходить сколы покрытия с дальнейшим образованием частиц. Во множестве работ доказано, что используемые серийные материалы, например 20Б, имеют плохую истираемость и низкую эрозионную стойкость [6].

Согласно схеме движения воздуха частицы должны уходить в отверстия сброса, так как со стороны межвальной полости выходит воздух с давлением выше, чем в полости сброса, и часть воздуха, проходящего межвальное лабиринтное уплотнение и не попавшего в первое отверстие, должна попадать во второе. Однако на практике, как сказано выше, был зафиксирован сигнал «стружка в масле».

Попадание частиц в маслосистему двигателя опасно тем, что может привести к преждевременному износу подшипников, особенно для двигателей с межвальными подшипниками, работающими в условиях большого нагружения [7]. Независимо от типа двигателя сигнал «стружка в масле» или обнаружение частиц на контрольных элементах (магнитных пробках, фильтрах и др.) может быть причиной досрочного съема двигателя с эксплуатации [8], с последующим ухудшением статистики наработки и уменьшением динамических показателей надежности [9].

### Расчет движения воздуха в межвальной полости

Для анализа направлений движения воздуха в межвальной полости выполнен трехмерный газодинамический расчет в программном пакете ANSYS CFX.

Подготовлена геометрическая модель межвальной полости, представляющая собой совокупность секторов  $1/6$  и  $1/360$  (в области гребешков уплотнения). Построена неструктурированная тетраэдрическая сеточная модель с семью призматическими слоями (для моделирования пограничного слоя) в модуле Mesh программного пакета ANSYS Workbench, количество элементов сетки составляет 3 045 671 (на рис. 2 увеличена сетка вблизи отверстия и в области гребешков).

Сеточная модель построена так, что количество тетраэдрических элементов в радиальных зазорах лабиринтного уплотнения составляет не менее трех, потому что доказано, что количество элементов в радиальных зазорах значительно влияет на качество моделирования [10].

Для расчетов применена SST-модель турбулентности, поскольку она сочетает в себе характерную для модели  $k-\omega$  способность корректно прогнозировать характеристики течения в погранслое и характерную для модели  $k-\varepsilon$  способность корректно разрешать ядро потока [11]. Настройка модели SST происходит путем подбора турбулентного числа Прандтля и построения сетки, позволяющей разрешить течение в пристеночных областях, – методика неоднократно подтверждена путем численного моделирования экспериментов и аналитических решений [12]. Настройки сеточной модели и модели турбулентности для расчета течения воздуха в межвальной полости:

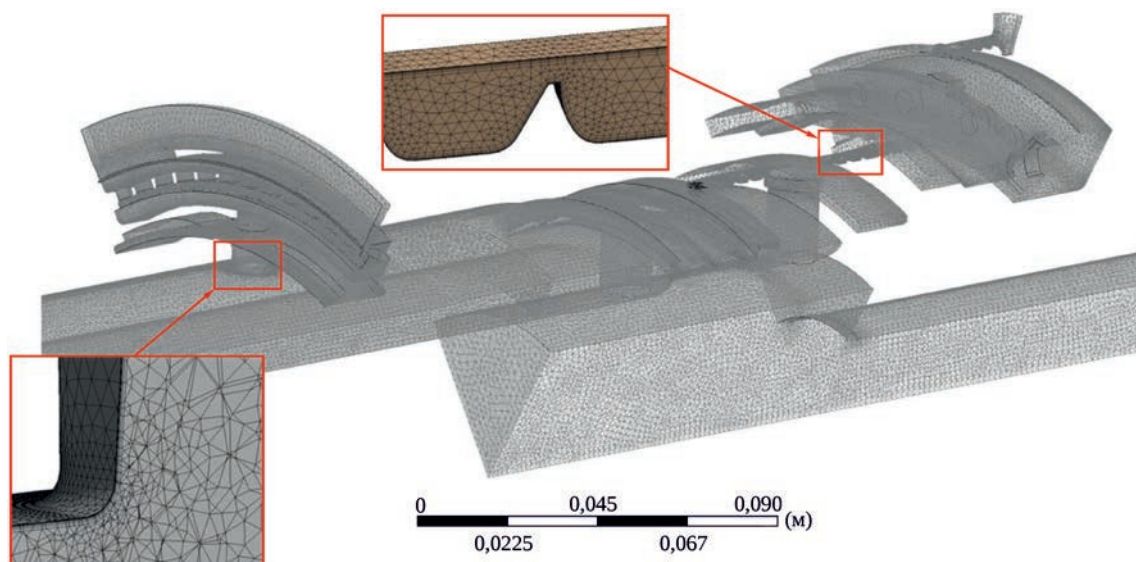


Рис. 2. Внешний вид сеточной модели

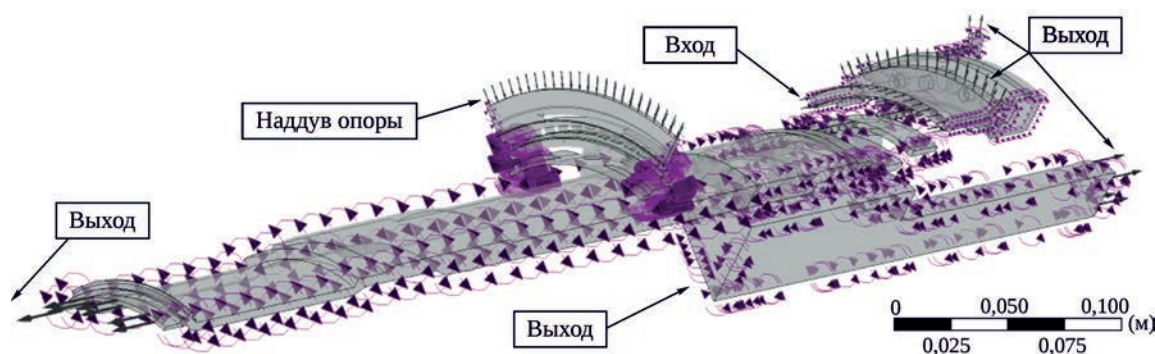


Рис. 3. Расчетная область

- турбулентное число Прандтля 0,8;
- призматических слоев на стенке – 10;
- толщина первого призматического пристенного слоя 0,05 мм;
- коэффициент роста призм 1,2.

Расчетная область (рис. 3) содержит границы входа (в том числе границу наддува опоры), выхода, условие периодичности и роторные стенки. В качестве рабочего тела используется воздух.

Граничные условия:

- вход/наддув опоры: расход воздуха ( $G$ ), полная температура ( $T^*$ );
- открытая граница (внутренняя полость вала ротора низкого давления): статическое давление ( $p$ ), статическая температура ( $T$ );

– выход: статическое давление ( $p$ ) – определены по результатам одномерного гидравлического расчета (расход на входе) и известных параметров отбора воздуха из компрессора (давление и температура).

После подготовки геометрической и сеточной моделей, а также выбора граничных условий выполнен трехмерный газодинамический расчет. На рис. 4 показано полученное распределение числа Маха в межваль-

ной полости и отмечен относительный расход воздуха (% от  $G_{КВД}$ ). Воздух попадает в межвальное лабиринтное уплотнение из полости между ТВД и ТНД, часть воздуха уходит в первое отверстие сброса. Затем воздух проходит вторую часть лабиринтного уплотнения, навстречу ему идет воздух из отверстия наддува опоры ТВД и они совместно попадают во второе отверстие сброса. Движения воздуха в сторону межвальной полости после прохождения лабиринтного уплотнения не наблюдается.

Для проверки трехмерной модели произведено сравнение давления и расхода воздуха с параметрами одномерной гидравлической модели, вычисленными по аналитическим зависимостям (рис. 5).

Исходя из проведенного расчета, можно сделать вывод о том, что движения частиц износа покрытия 20Б с межвального лабиринтного уплотнения в сторону полости нет, следовательно, проведенного расчета недостаточно для подтверждения факта сигнала «стружка в масле» на двигателе и разработки мероприятий по устранению дефекта. Необходимо проводить газодинамический расчет с трехмерным моделированием движения частиц встроенными инструментами ANSYS CFX [13; 14].

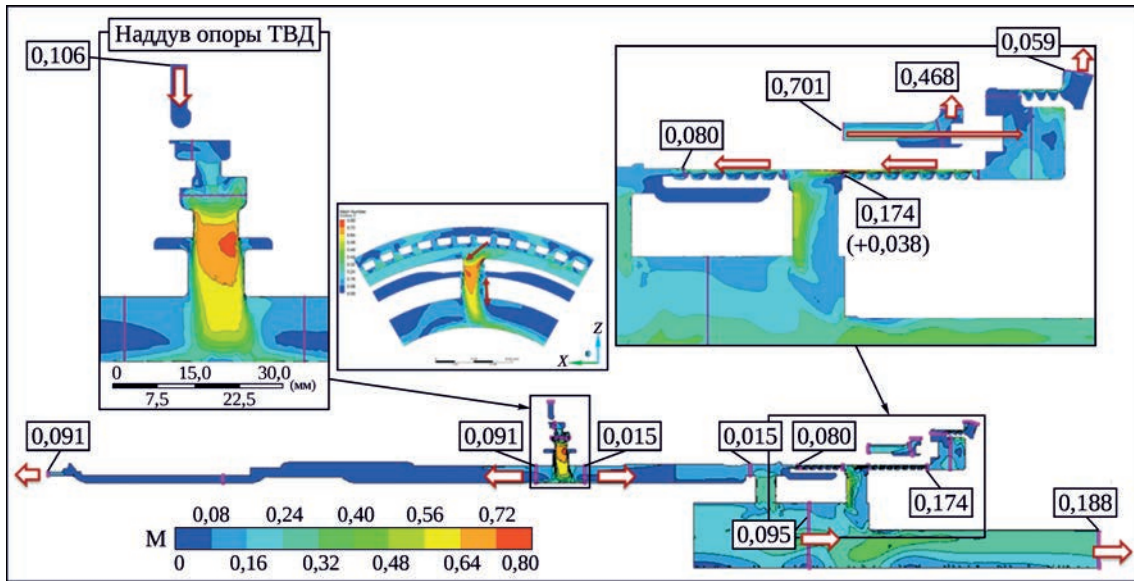
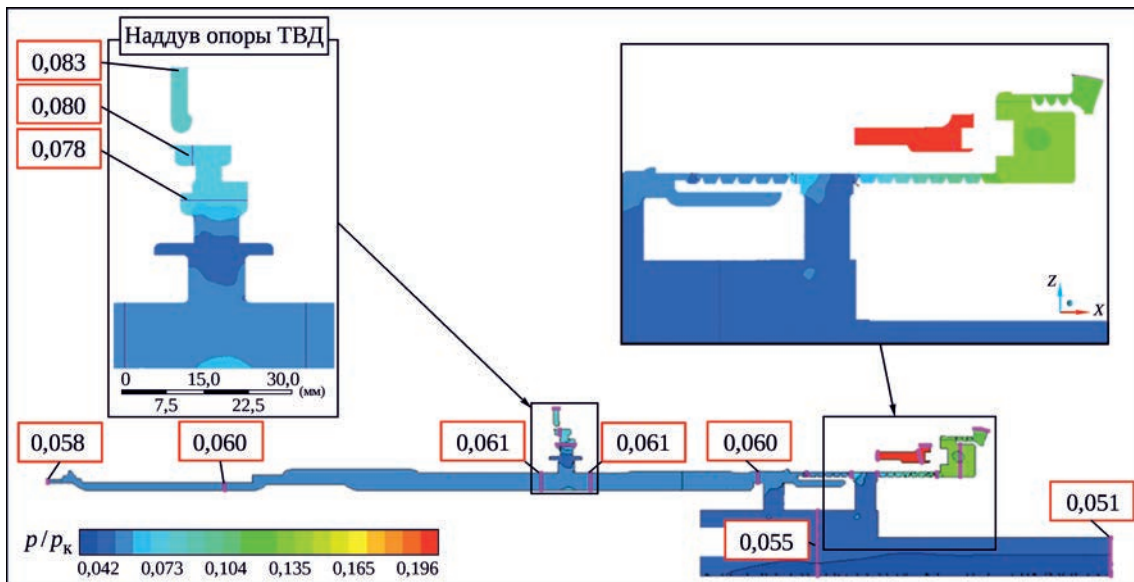
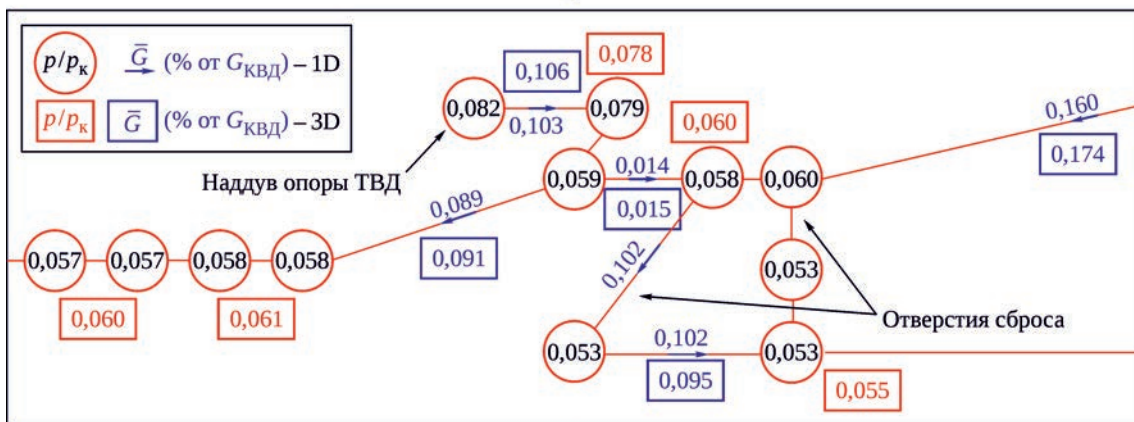


Рис. 4. Число Маха и относительный расход воздуха (% от  $G_{\text{КВД}}$ ) в межвальной полости



а



б

Рис. 5. Сравнение трехмерной модели течения в межвальной полости (а) с одномерной гидравлической моделью (б)

## Расчет движения частиц в межвальной полости

Для расчетного подтверждения факта попадания частиц в маслосистему двигателя проведен более подробный анализ с моделированием движения частиц.

Граничные условия аналогичны предварительно проведенному газодинамическому расчету, дополнительно вводятся начальные условия для распыла частиц:

– область распыла частиц задана за частью лабиринтного уплотнения, расположенной непосредственно перед межвальной полостью;

– сферические частицы имеют диаметр 0,5 мм и плотность  $8933 \text{ кг/м}^3$  (медь);

– коэффициент отражения скорости по нормали к поверхности 0,9;

– начальная скорость движения частиц – средняя скорость между валами роторов высокого и низкого давления;

– конус распыла частиц  $15^\circ$ .

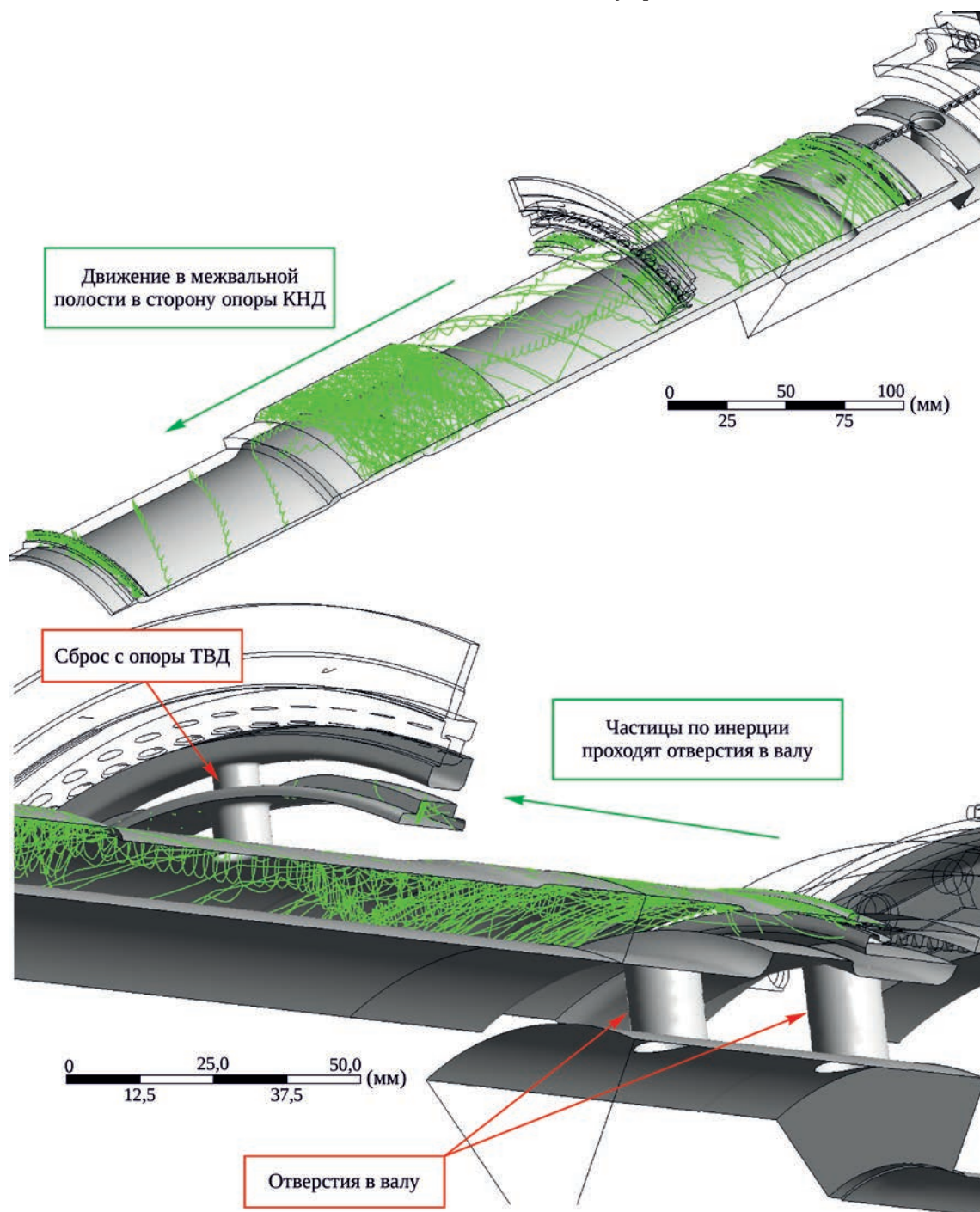


Рис. 6. Траектория движения частиц в межвальной полости

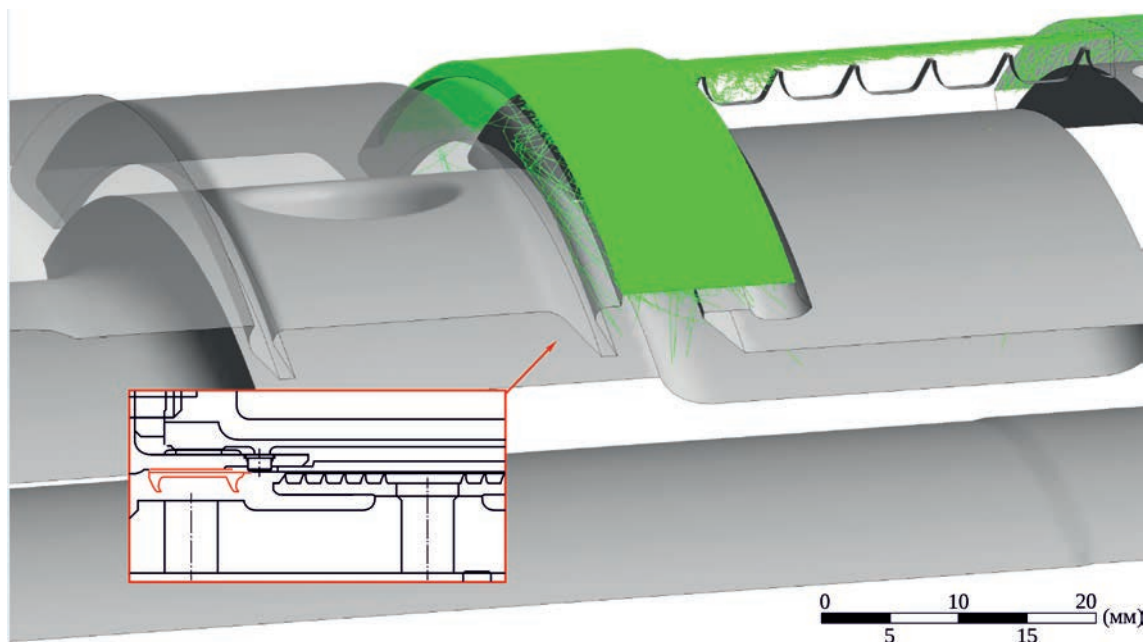


Рис. 7. Влияние двузубого грязеотбойника на траекторию движения частиц

Согласно результатам газодинамического расчета (рис. 6), все запущенные с лабиринтного уплотнения частицы летят вперед по инерции, против потока, идущего с опоры роликоподшипника ТВД, и не попадают в отверстия сброса в валу ТНД. Это происходит потому, что инерция частиц больше, чем сопротивление со стороны потока, идущего из отверстия наддува опоры ТВД с малой скоростью. Под действием центробежных сил некоторое количество частиц прижимается к стенке вала высокого давления и попадает в отверстия сброса с опоры роликоподшипника ТВД. Остальные частицы движутся вперед, по направлению к опоре КНД.

Такое моделирование качественно показывает, каким образом истираемое покрытие попадает в маслосистему, двигаясь противоположно потоку воздуха. Данное явление может наблюдаться в большинстве уплотнений подобной схемы, так как при наддуве опор воздух подается под относительно невысоким давлением и частицы, движущиеся по инерции, могут преодолевать воздушные потоки и не попадать в отверстия сброса.

### Предотвращение попадания частиц в межвальную полость

С целью предотвратить движение частиц покрытия из межвального лабиринтного уплотнения в сторону опоры КНД и их попадание в маслосистему двигателя применен двузубый грязеотбойник, расположенный над отверстием сброса.

При возможном проникновении частиц через ближний к лабиринтному уплотнению зуб грязеотбойника

их будет улавливать дальний зуб, с которого при выключении двигателя частицы будут падать в отверстия сброса в валу ТНД, не попадая в маслосистему двигателя.

На рис. 7 показан двузубый грязеотбойник и траектория движения частиц, запускаемых из-за межвального лабиринтного уплотнения. Граница распыла частиц сдвинута за лабиринт для подробного рассмотрения движения частиц, захватываемых грязеотбойником (тогда как в предыдущем расчете рассматривалась лишь возможность передвижения частиц против потока в область опоры роликоподшипника). Трехмерное моделирование показало эффективность двузубого грязеотбойника.

### Заключение

В результате проделанной работы были сделаны следующие выводы. При применении истираемых покрытий в межвальных лабиринтных уплотнениях (а также во всех лабиринтных уплотнениях, сообщающихся с маслосистемой) возможно попадание частиц износа покрытия в маслосистему, так как инерция частиц может превышать сопротивление со стороны воздушных потоков наддува опор, имеющих относительно невысокие давление и скорость.

Предотвратить попадание частиц износа истираемых покрытий в маслосистему позволят двузубые грязеотбойники. Их необходимо располагать над отверстиями сброса, а зубья грязеотбойника – направлять против потока воздуха, идущего из лабиринтного уплотнения.

---

## Литература

1. Снитко М.А., Торопчин С.В., Ворожейкин Д.В. «Приземление» авиадвигателя ПД-14 для разработки промышленных ГТУ // Электрические станции. 2019. № 11. С. 28–30.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. М. : Машиностроение, 2008. 368 с. (Газотурбинные двигатели).
3. Темис Ю.М., Селиванов А.В. Перспективные уплотнения для газотурбинных двигателей // Авиационные двигатели. 2021. № 2 (11). С. 43–60.
4. Актуальность задачи унификации и оптимизации уплотнений в газотурбинных двигателях / П.В. Крылов, С.В. Перевезенцев, В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин // Газовая промышленность. 2017. № 11 (760). С. 56–61.
5. Троянов А.Е., Гришанов О.А., Виноградов А.С. О тепловой защите масляных полостей опор создаваемых ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2009. № 3-1. С. 318–328.
6. Истираемость и эрозийная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД / Д.П. Фарафонов, В.П. Мигунов, А.А. Сараев, Н.Е. Лещев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн. 2018. № 8 (68). С. 70–80. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2022). DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
7. Хоذاцкий С.А., Караваев Ю.А., Сафарбаков А.М. Оценка напряженно-деформированного и теплового состояния межвальных подшипников ГТД // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 1 (45). С. 41–48.
8. Оценка технического состояния авиационных двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154 по результатам сцинтилляционных измерений / В.В. Бушманов, В.В. Дроков, В.Г. Дроков, Ю.Д. Скудаев, А.А. Элькес // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2006. № 2-1 (10). С. 348–352.
9. Асадуллин М.Р. Методика технико-экономической оценки эффективности повышения надежности авиационных газотурбинных двигателей военного назначения при их послепродажном обслуживании по нормируемым показателям конечного результата // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика» = Perm University Herald. Economy. 2016. № 3 (30). С. 77–91.
10. Попова Д.Д., Попов Д.А., Самойленко Н.А. Исследование влияния параметров сеточной модели и модели турбулентности на качество моделирования аэродинамических процессов в области радиального зазора рабочих лопаток турбины // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2021. № 66. С. 67–78.
11. Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчета течения в камере сгорания газотурбинного двигателя // Труды МАИ : электрон. журн. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php>.
12. Валидация модели турбулентности для определения теплового состояния лопаток газовых турбин / А.В. Гаскаров, С.Е. Пискунов, Д.А. Попов, С.И. Сендюров // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2022. № 68. С. 64–76.
13. Мостовенко Л.В. Расчетно-экспериментальное моделирование течения запыленного потока для оценки влияния геометрических характеристик инерционно-вакуумного золоуловителя на степень улавливания золы : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 165 с.
14. Усманова Р.Р., Заиков Г.Е., Дебердеев Р.Я. Моделирование закрученных турбулентных потоков при оптимизации процесса разделения дисперсных систем // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 4. С. 124–129.

## References

1. Snitko M.A., Toropchin S.V., Vorozheikin D.V. "Landing" the aircraft engine PD-14 for the development of industrial gas turbine units. Elektricheskie stantsii [Electrical stations]. 2019. No. 11. P. 28–30.
2. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. Osnovy konstruirovaniia aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok [Principles of aero-engines and power generation gas turbines designing]. Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 2008. 368 p. (Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]).
3. Temis Yu.M., Selivanov A.V. Advanced seals for gas-turbine engines. Aviatsionnye dvigateli [Aviation Engines]. 2021. No. 2 (11). P. 43–60.
4. Krylov P.V., Perevezentsev S.V., Perevezentsev V.T., Shilin M.A. Urgency of the problem of unifying and optimizing seals in the gas turbine engines. Gazovaia promyshlennost' [Gas Industry]. 2017. No. 11 (760). P. 56–61.

- 
5. Troyanov A.Y., Grishanov O.A., Vinogradov A.S. About the thermal protection of the oil cavities for designing gas turbine engines. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta) [VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2009. No. 3-1. P. 318–328.
  6. Farafonov D.P., Migunov V.P., Saraev A.A., Leschev N.E. Abradability and erosion resistance of seals in turbine engine air gas channel. Trudy VIAM: elektronnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal. [Proceedings of VIAM: scientific and technical on-line journal]. 2018. No. 8 (68). P. 70–80. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 01.11.2022). DOI 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
  7. Khodatsky S.A., Karavaev Y.A., Safarbakov A.M. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo i teplovogo sostoianiia mezhval'nykh podshipnikov GTD [Assessment of stress-strain and thermal state of intershaft bearings of a gas-turbine engine]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2015. No. 1 (45). P. 41–48.
  8. Buchmanov V.V., Drovkov V.V., Drovkov V.G., Skudaev Ju.D., Alkes A.A. Estimation of aviation engines D-30KP/KU/KU-154 technical condition by scintillation measuring. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva [VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2006. No. 2-1 (10). P. 348–352.
  9. Asadullin M.R. Method for technical and economic evaluation of the effectiveness of reliability improvement of military aircraft gas-turbine engines in their aftersales support based on outcome performance measures. Vestnik Permskogo universiteta. Seriya "Ekonomika" [Perm University Herald. Economy]. 2016. No. 3 (30). P. 77–91.
  10. Popova D.D., Popov D.A., Samoylenko N.A. Investigation of the grid model and turbulence model parameters influence on quality of turbine rotor blade tip clearance area aerodynamic processes modeling. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2021. No. 66. P. 67–78.
  11. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. Hydrodynamic verification and validation of numerical methods of the flow calculation in combustion chamber of a gas turbine engine. Trudy MAI : network scientific periodic publication. 2017. No. 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php>.
  12. Gaskarov A.V., Piskunov S.E., Popov D.A., Sendyurev S.I. Validation of the turbulence model for predicting the thermal state of gas turbine blades. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2022. No. 68. P. 64–76.
  13. Mostovenko L.V. Raschetno-eksperimental'noe modelirovanie techeniia zapylennogo potoka dlia otsenki vliianiia geometricheskikh kharakteristik inertsiionno-vakuumnogo zoloulovitelia na stepen' ulavlivaniia zoly [Computational and experimental modeling of motion in dust-laden flow to assess the influence of geometric characteristics of an inertial-vacuum ash collector on ash collection efficiency]. Ph.D. thesis in Engineering Science. Omsk, 2020. 165 p.
  14. Usmanova R.R., Zaikov G.E., Deberdeev R.Ia. Modelirovanie zakruchennykh turbulentnykh potokov pri optimizatsii protsessa razdeleniia dispersnykh sistem [Modeling of turbulent swirling flows with optimization of dispersed systems' separation process]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan technological university (Bulletin of Technological university)]. 2014. No. 4. P. 124–129.

*Материалы получены редакцией 26.10.2022*