

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КЛАПАННЫХ УПЛОТНЕНИЙ

© 2017

Ю. И. Кондрашов кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок;
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
kon-urij@yandex.ru

Р. Н. Сергеев инженер-конструктор;
Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара;
romansr@yandex.ru

Рассматриваются процессы, возникающие при герметизации уплотнений контактных поверхностей клапана. Предложена математическая модель упругого контакта, позволяющая решить задачу деформирования контактирующих поверхностей с учётом их жёсткости путём решения системы линейных уравнений и метода конечных элементов. Для решения проблем диагностирования и исследования герметичности контактных поверхностей предлагается использовать контрольно-измерительную систему на основе цифровой спекл-интерферометрии с непрерывным лазером.

Клапан; уплотнительные поверхности; напряжённо-деформированное состояние; метод конечных элементов; неразрушающий контроль; цифровой спекл-интерферометр.

Цитирование: Кондрашов Ю.И., Сергеев Р.Н. О некоторых вопросах оценки герметичности клапанных уплотнений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 3. С. 155-164. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164

Введение

В последние годы всё большее внимание уделяется решению вопросов надёжной эксплуатации различных объектов машиностроения по техническому состоянию. К числу приоритетных задач в авиационной промышленности относят создание комплектующих агрегатов различных систем с ресурсом, обеспечивающим безаварийную эксплуатацию в течение всего срока службы летательного аппарата, причём для некоторых изделий такой срок эксплуатации может составлять 40 – 45 лет. Известно, что к числу элементов пониженной эксплуатационной надёжности относятся, прежде всего, элементы уплотнений, обеспечивающие герметичность при управлении потоками различных рабочих сред [1;2].

Величина утечки среды через уплотнения зависит от качества уплотнительных поверхностей (микрogeометрии, степени отклонений от идеальной поверхности и волнистости), перепада давлений, ширины уплотнительных поверхностей, контактирующих материалов, свойств и состояния рабочей среды, гидрофильности или гидрофобности уплотнительных поверхностей, величины контактных давлений конструкции контактного уплотнения. Определение требуемых усилий для обеспечения герметичности по уплотнённым поверхностям на стадии проектирования, а также качественная оценка различных факторов, влияющих на герметичность в процессе изготовления, являются актуальной задачей [3 – 5].

Область контакта уплотнителя с уплотняемой поверхностью отличается неоднородностью структуры. В ней нет полной сплошности, свойственной материалу основных деталей, и можно выделить пустоты в участках контакта поверхностных плёнок. Уплотняющий эффект достигается заполнением всех микронеровностей и дефектов

контактной поверхности материалом уплотнителя. Для этого, очевидно, уплотнитель должен быть сжат некоторой силой, создающей в поверхностных слоях напряжение, достаточное для деформации уплотнителя и заполнения неровностей. Сближение поверхностей происходит обычно в две стадии. На первой стадии происходит внедрение самых больших выступов и сближение поверхностей до контакта выступов высотой, примерно равной R_z (параметр шероховатости R_z определяемый как высота неровностей профиля по десяти точкам), при этом образуется система впадин и капилляров произвольной формы, близкой к плоским щелям. На второй стадии происходит основная герметизация соединения в результате перекрытия микроканалов.

При эксплуатации агрегатов существенное влияние на показатель герметичности также оказывают остаточные напряжения в уплотняемых поверхностях, уплотнителях, причём величина этих напряжений зависит от способа получения и обработки. Кроме того, в результате процесса срабатывания, влияния вибрационного нагружения, эти напряжения могут значительно возрастать, при этом изменится и сама структура уплотняемых материалов [6].

Методика оценки герметичности

Явления, происходящие при герметизации контактных поверхностей, имеют явную нелинейность и поэтому существующие методики расчета не позволяют оценить влияние многочисленных факторов на герметичность. Расчёты по определению напряжённо-деформированного состояния уплотнения с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [2] позволяют выбрать, например, геометрические параметры клапанных уплотнений. Для обеспечения герметичности обычно исходят из следующих условий:

– контактное давление P_k не должно превышать допустимую величину, определяемую исходя из заданного ресурса и прочности с учётом статистических данных по работоспособности контактирующих материалов пары в различных условиях эксплуатации;

– минимального усилия герметизации при минимальности требуемой энергии деформации зоны контактирующих поверхностей с учётом допустимой интенсивности их изнашивания для определения типа привода и его весовых и габаритных размеров.

В этом случае для схемы механизма (рис. 1, *а*) и расчётной схемы (рис. 1, *б*) общее усилие герметизации равно:

$$N = N_q \pm N_p,$$

где N_q – составляющая для деформации сдвига; N_p – составляющая, требуемая для компенсации действия рабочей среды; «+» – при воздействии давления на клапан, «-» – при воздействии среды под клапан.

Наиболее простым в реализации решения задачи контактного взаимодействия с использованием МКЭ является подход, при котором сопряжение контактирующих тел осуществляется непосредственно по узлам.

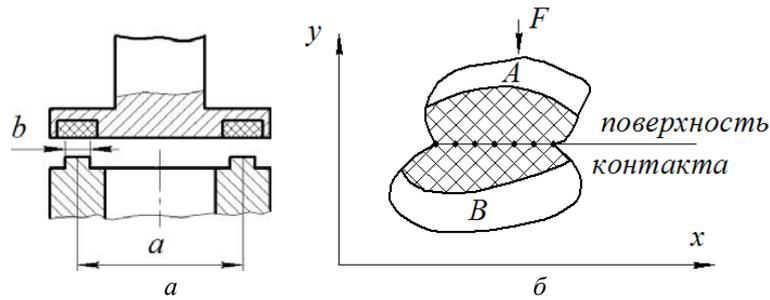


Рис. 1. Схемы: а – клапанного механизма; б – расчёта контакта двух тел; А, В – контактирующие тела

В этом случае возможны два подхода к решению этой задачи. Первый подход – отождествление узлов обоих тел, примыкающих к контактной поверхности, даже при заранее известной площади контактной поверхности не позволяет учитывать проскальзывание между контактирующими телами в тангенциальном направлении. Второй подход предполагает представление из контактирующих тел отдельной конечно-элементной модели и решение полученных уравнений с учётом того, что перемещения контактирующих точек обоих тел в направлении нормальной контактной поверхности должны совпадать. Одновременно на каждом этапе решения проверяется положительность сил нормальной реакции в каждой контактной точке, а в случае отрицательных значений корректируется площадь контакта.

Решение упругой осесимметричной контактной задачи для клапанного уплотнения при указанных подходах не представляет принципиальных затруднений. Однако как и в любых задачах с применением МКЭ, для обеспечения необходимой точности результатов расчёта требуется определённая дискретизация исследуемых тел. Оптимальная схема дискретизации элементов клапанного уплотнения отрабатывается в ходе сравнения результатов расчёта и распределения полей нагруженности, полученных экспериментально, например, с помощью метода фотоупругости. В связи с тем, что метод фотоупругости наиболее удобен для плоских образцов, при обработке схемы дискретизации осесимметричная контактная задача может быть заменена двухмерной [1]. Метод фотоупругости предпочтительней заменить методами когерентной оптики, в частности методом спекл-интерферометрии [7 – 11].

Рассмотрим систему из двух контактирующих тел А и В. Для избежания громоздких выкладок примем контактную поверхность в виде плоскости и выберем систему координат так, чтобы ось O_x была параллельной контактной поверхности (рис. 1, б). Если тело В закреплено, то граничные условия для тела В можно задать в виде перемещений в закреплённой зоне, а граничные условия телу А можно задать только в виде сил. Введём следующие обозначения: K^A, K^B – матрицы жёсткости тел А и В соответственно (без учёта контактных взаимодействий; δ^A, δ^B – векторы узловых перемещений). Выделим в матрицах блоки – подматрицы и подвекторы, соответствующие нормальным перемещениям и силам контактной (индекс «k») и бесконтактной (индекс «c») зон.

Запишем уравнения для тела:

$$\begin{bmatrix} K_{KK}^B & K_{KC}^B \\ (K_{KC}^B)^T & K_{CC}^B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_k^B \\ \delta_c^B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^B \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где K_{KC}^B – матрица связи; K_{KK}^B – матрица контактной зоны B ; K_{CC}^B – матрица тела B бесконтактной зоны; F^B – вектор узловых контактных усилий, действующих на тело B .

Выполнив преобразования, получим:

$$\delta_k^B = S^B F^B, \quad (2)$$

$$S^B = \left[K_{KK}^B - K_{KC}^B (K_{KC}^B)^{-1} (K_{CC}^B)^T \right]. \quad (3)$$

Поскольку для тела A матрицы K^A , K_{CC}^B вырождены, то записать для него соотношения вида (2), (3) непосредственно нельзя. Рассмотрим три вектора узловых перемещений, определяющих движение тела A как жёсткого целого. Если обозначить их через δ^x , δ^y , δ^{xy} , то любое перемещение тела A как жёсткого тела можно представить в виде:

$$a\delta^x + b\delta^y + c\delta^{xy},$$

где a, b, c – скаляры.

Таковыми векторами могут служить первые три собственных вектора матрицы K^A , полученные при решении задачи $\det(K^A - \lambda I) = 0$. Они также могут быть определены геометрически. Рассмотрим лишь такие векторы δA узловых перемещений, которые определяют движения, не содержащие составляющей перемещения тела A как жёсткого целого. Такие векторы удовлетворяют следующему равенству:

$$(\delta^x)^T = (\delta^y)^T \delta^A = (\delta^{xy})^T \delta^A = 0. \quad (4)$$

С учётом вышесказанного запишем уравнения равновесия для тела A в виде:

$$\begin{bmatrix} K_{KK}^A & K_{KC}^A \\ (K_{KC}^A)^T & K_{CC}^A \\ \delta_K^x & \delta_C^x \\ \delta_K^y & \delta_C^y \\ \delta_K^{xy} & \delta_C^{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_K^A \\ \delta_C^A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^B \\ f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где f – вектор узловых внешних усилий, действующих на тело B .

Введя новые обозначения \overline{K}_{CK}^A , \overline{K}_{CC}^A , запишем выражение (5) в виде:

$$\begin{bmatrix} K_{KK}^A & K_{KC}^A \\ \overline{K}_{CK}^A & \overline{K}_{CC}^A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_K^A \\ \delta_C^A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^B \\ \overline{f} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Выполнив преобразования, получим:

$$\delta_K^A = S^A F^A + S_A^A \overline{f}, \quad (7)$$

где $S_A^A = \left[K_{KK}^A - K_{KC}^A \left(\overline{K}_{CC}^A \right) + \overline{K}_{CK}^A \right]^{-1}$, $S_f^A = S_A K_{CC}^A \left(\overline{K}_{CC}^A \right)^+$; знак (+) означает псевдообратную матрицу.

Для контактных перемещений в направлении O_y должны выполняться соотношения:

$$a\delta_K^x + b\delta_K^y + c\delta_K^{xy} + \delta_K^A = \delta_K^B + \delta_K^0, \quad (8)$$

где δ_K^0 – начальный зазор между телами в узловых контактных точках, а выражение $a\delta_K^x + b\delta_K^y + c\delta_K^{xy}$ означает вклад в суммарное перемещение движения тела A как жёсткого целого в направлении оси O_y . Подставляя выражения (2), (7) в выражение (8), получаем:

$$S^A F^A + S_f^A \overline{f} + a\delta_K^x + b\delta_K^y + c\delta_K^{xy} = S^B F + \delta_K^0. \quad (9)$$

Так как $F^A = F^B = F$, то уравнение (9) принимает вид:

$$-(S^A + S^B)F = S_f^A \overline{f} + a\delta_K^x + b\delta_K^y + c\delta_K^{xy} - \delta_K^0. \quad (10)$$

Число неизвестных в уравнении (10) равно $n+3$ при n уравнениях в выражении, где n равно числу узловых точек на поверхности контактирования каждого тела. Недостающие три уравнения получаются из условий статического равновесия тела A и имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum F_x + \sum f_x &= 0, \\ \sum F_y + \sum f_y &= 0, \\ \sum M_{xy} + \sum m_{xy} &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\sum F_x$, $\sum F_y$ – сумма компонентов контактных усилий в направлении осей O_x и O_y соответственно; $\sum f_x$, $\sum f_y$ – сумма соответствующих компонентов внешних сил; $\sum M_{xy}$, $\sum m_{xy}$ – моменты контактных и внешних сил вокруг центра масс тела A .

Очевидно, что для рассматриваемой задачи $\sum F_x = \sum f_x = 0$ и для получения разрешимой системы уравнений необходимо положить $a = 0$.

Система уравнений (10), (11) является линейной, если площадь контакта заранее известна. Если контактирование имеет место не по всей поверхности, то система уравнений становится нелинейной, а процесс решения является итеративным, требующим на каждом шаге проверки значения компонентов вектора F на положительность.

Вышеприведённые соотношения позволяют решать задачу об упругом контакте при том предельном условии, что силы тангенциального взаимодействия между контактирующими поверхностями равны нулю. Другой предельной ситуацией, как отмечалось ранее, является случай, когда проскальзывание между телами в зоне контакта отсутствует, то есть тангенциальные перемещения каждой пары находящихся в контакте точек совпадают. Если поверхность контактирования заранее известна, то строится общая конечно-элементная модель обоих контактирующих тел с учётом того, что узлы

тел по контактной поверхности совпадают. Обозначив полученную таким образом матрицу жёсткости через K , решение задачи можно свести к решению системы линейных уравнений:

$$K\delta = f, \quad (12)$$

где δ – вектор узловых перемещений всей конструкции.

Получив из уравнения (12) значения вектора δ , можно выделить из него часть, соответствующую ранее рассмотренному вектору узловых перемещений тела $B-\delta_K^B$. Вектор контактных усилий получается равным:

$$F = -K^B \delta_K^B. \quad (13)$$

Результаты оценки герметичности уплотнения

Предлагаемая методика позволяет производить оценки напряжённо-деформированного состояния, например, полимерного уплотнения.

Результаты расчётов методом конечных элементов позволяют оценить контактную податливость тарели клапана с уплотнением из полимера и тем самым исследовать напряжённо-деформированное состояние в уплотнителе с оценкой правомерности упругого расчёта в пределах упругости.

Проведены расчёты для оптически прозрачного материала ПК-М-3 для схемы, показанной на рис. 2.

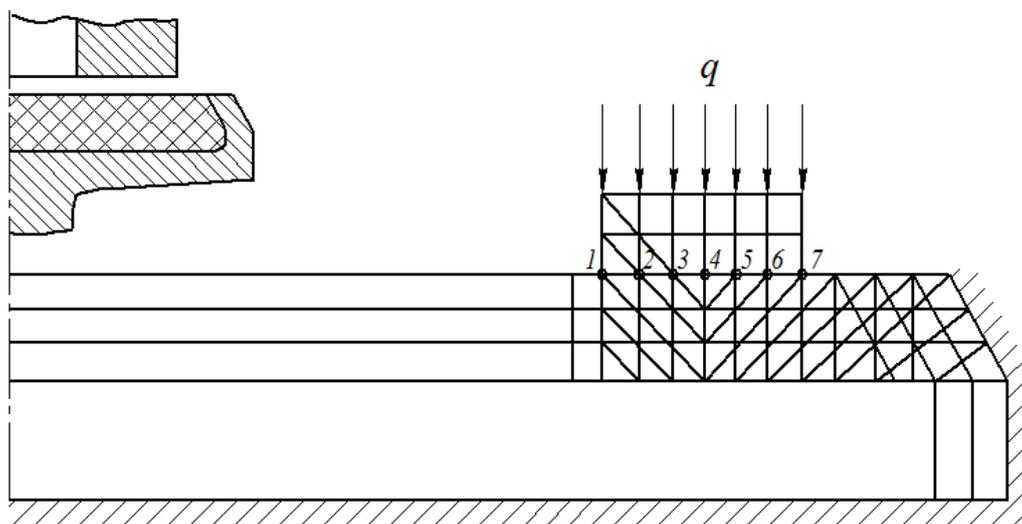


Рис. 2. Расчётная схема клапанного уплотнения с плоским контактом:
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – общие точки контакта

На рис. 3 показано распределение осевых нагружений σ_z в теле уплотнения вблизи уплотнительной поверхности (напряжения приведены к геометрическому центру конечных элементов).

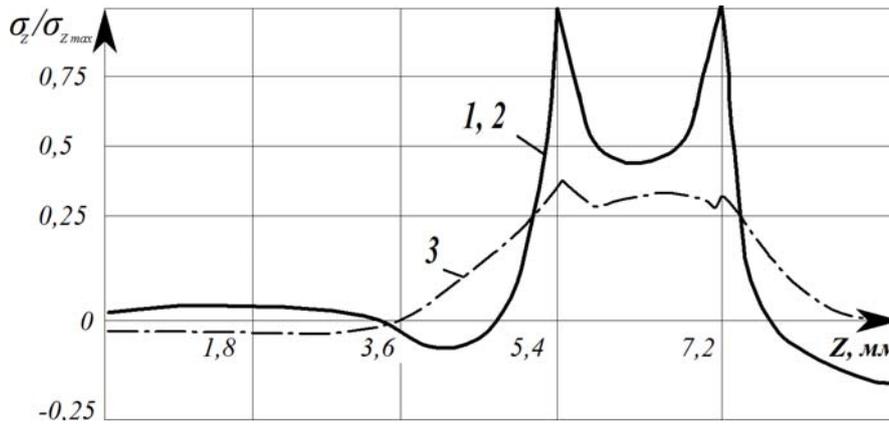


Рис. 3. Распределение нормированных осевых напряжений в теле уплотнителя:

$$\sigma_{z \max}^{(1)} = 1,327q_{кр}; \sigma_{z \max}^{(2)} = 1,377q_{кр}; \sigma_{z \max}^{(3)} = 1,235q_{кр}$$

Влияние шероховатости контактирующих поверхностей, наличие внутренних нагружений, изменение макроскопического состояния уплотнителя контактирующих материалов в результате эксплуатации не рассматриваются.

Экспериментальные методы исследования уплотнения

Решение вышеобозначенных вопросов важно для прогнозирования работы многих агрегатов и повышения их ресурса. До последнего времени экспериментальными методами исследования ввиду оптической непрозрачности практически всех контактирующих элементов уплотнительных пар оставались вибромеханические методы. В Самарском университете разработаны для технической диагностики мобильный и стационарный цифровые спекл-интерферометры (ЦИ) с непрерывным лазером [6;10;11]. Их широкое применение позволяет не только существенно расширить область исследований явления герметизации, но и распространить исследования на различные схемы клапанных устройств (рис. 4).

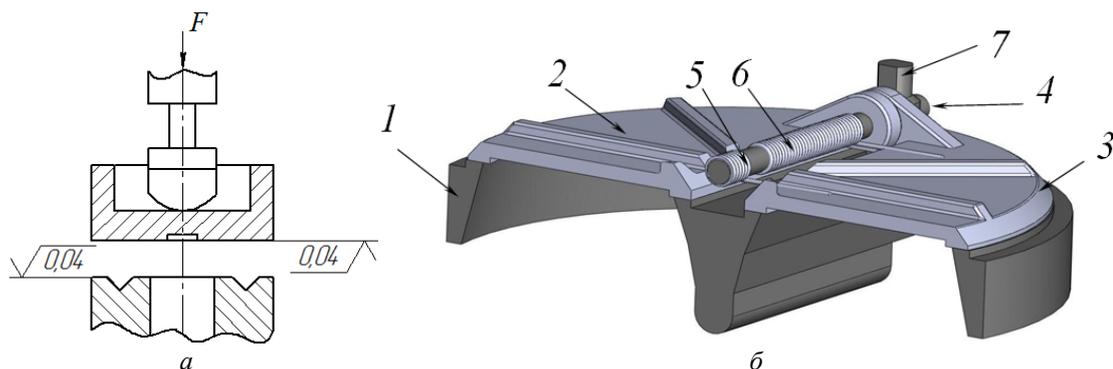


Рис. 4. Клапанные уплотнения типа «металл-металл» с уплотнением «плоскость по плоскости»:

а – схема перекрытого управляемого клапана; б – 3D модели обратного клапана;

1 – силовое кольцо с поперечной балкой; 2,3 – рабочие пластины; 4 – ось крепления пластин; 5,6 – прижимные пружины; 7 – стойка крепёжная

Применяя цифровые спекл-интерферометры, можно на стадии изготовления оценить качество контактирующих поверхностей и выявить фактические зоны появления протечек через уплотнение. Результаты проведённых исследований на эксперимен-

тальной модели (рис. 5, а), имитирующей уплотнение «плоскость по плоскости» на основе «металл-металл», подтверждают возможности цифровых спекл-интерферометров с непрерывным лазером для диагностики уплотняемых поверхностей контактирующих элементов (рис. 5, б), являющихся источником появления утечки рабочей среды [4].

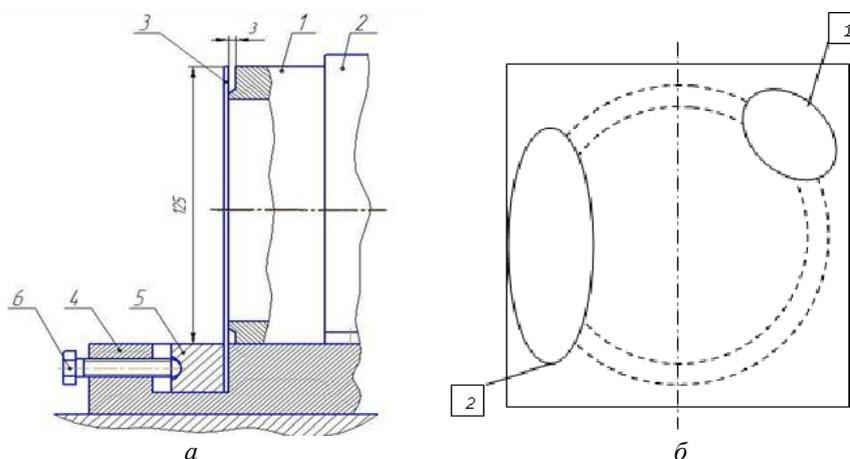


Рис. 5. а – схема конструкции экспериментальной модели уплотнения «плоскость по плоскости» на основе «металл-металл»: 1 – корпус; 2 – хомут крепёжный; 3 – рабочая пластина; 4 – корпус тисков; 5 – пластина опорная; 6 – болт крепёжный; б – выявленные экспериментально щелевые зазоры 1,2 со стороны наружной поверхности рабочей пластины

Заключение

1. Изменение макроскопического состояния контактирующих элементов уплотнения в сочетании с изменяющимися показаниями по герметичности предоставит хорошую статистику по процессам, протекающим при взаимодействии элементов уплотнений, и возможность прогнозирования эксплуатации агрегатов без разборки изделия и его осмотра, а только по результатам замера герметичности в составе объекта.

2. Проведённые исследования с экспериментальной моделью клапана, а также серийного узла обратного клапана подтверждают возможность применения разработанного контрольно-измерительного комплекса на основе ЦСИ как для вибродиагностики, так и для визуализации микротечей между контактирующими поверхностями.

3. Применение разработанного контрольно-измерительного комплекса совместно с предлагаемой методикой на стадии изготовления клапанных уплотнений позволяет оценить качество контактирующих поверхностей и выявить в них фактические зоны протечек.

Библиографический список

1. Евстигнеев А.Н., Жуковский А.Е., Квасов В.М., Кондрашов Ю.И., Малеев А.Ф., Шахматов Е.В., Шестаков Г.В. Основы создания агрегатов автоматических пневмогидравлических систем летательных аппаратов. Ч. I. Обеспечение конструкторской надёжности и технологичности агрегатов. Самара: Импульс, 1993. 375 с.
2. Макарьянц Г.М., Свербилов В.Я., Макарьянц М.В. Численное моделирование и анализ полей течения газа в тарельчатом клапане // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2009. С. 9-10.
3. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 5. С. 47-57.

4. Шахматов Е.В., Журавлев О.А., Комаров С.Ю. Исследование акустического возбуждения мембраны в потоке газа // Сборник трудов X международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». М.: Московский энергетический институт, 2009. С. 480-483.
5. Журавлёв О.А., Сергеев Р.Н., Ивченко А.В., Кондрашов Ю.И. Визуализация структуры потока газа при разупрочнении клапана // Сборник трудов XII международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков». М.: Московский энергетический институт, 2013.
6. Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Макарьянц Г.М., Сергеев Р.Н., Харчикова Ю.В. Исследование резонансных колебаний рабочей пластины в экспериментальной модели пневмоклапана // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3(27), ч. 3. С. 363-369.
7. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
8. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
9. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натуральных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 1. С. 82-89.
10. Zhuravliov O.A., Shaposhnikov Yu.N., Sheglov Yu.D., Komarov S.Yu., Zhuzhukin A.I., Ivchenko A.V., Sergeev R.N. The Noise proof Digital Speckle Pattern Interferometer for Vibration Modes Study to Industrial Demands // International Conference on Applications for Image based Measurements (ICAIM). 2012.
11. Shakhmatov E.V., Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Safin A.I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb // Procedia Engineering. 2015. V. 106. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.031

ADVANCED METHODS FOR ASSESSING SEALING ABILITY OF VALVE SEALS

© 2017

Yu. I. Kondrashov

Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
kon-uri@yandex.ru

R. N. Sergeev

Design engineer;
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;
romansr@yandex.ru

The paper deals with the processes that arise when sealing valve contact surfaces. A mathematical model of elastic contact is proposed that allows solving the problem of deformation of contacting surfaces with allowance for their rigidity by solving a system of linear equations and using the finite element method. To solve the problems of diagnosing and investigating the tightness of contact surfaces, a control and measuring system based on digital speckle interferometry with a continuous laser is proposed.

Valve; sealing surfaces; stress-strain state; finite element method; non-destructive testing; digital speckle interferometer.

Citation: Kondrashov Yu.I., Sergeev R.N. Advanced methods for assessing sealing ability of valve seals. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 3. P. 155-164. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-3-155-164

References

1. Evstigneev A.N., Zhukovskiy A.E., Kvasov V.M., Kondrashov Yu.I., Maleev A.F., Shakhmatov E.V., Shestakov G.V. *Osnovy sozdaniya agregatov avtomaticheskikh pnevmogidravlicheskih system letatel'nykh apparatov. Ch. I. Obespechenie konstruktorskoj nadezhnosti i tekhnologichnosti agregatov* [Principles of producing aircraft automatic air-hydraulic systems. Part I. Providing design reliability and manufacturability of units]. Samara: Impul's Publ., 1993. 375 p.
2. Makar'yants G.M., Sverbilov V.Ya., Makar'yants M.V. Chislennoe modelirovanie i analiz poley techeniya gaza v tarel'chatom klapanе. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya»*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2009. P. 9-10. (In Russ.)
3. Okulov V.L., Naumov I.V., Sorensen J.N. Optical diagnostics of intermittent flows. *Technical Physics*. 2007. V. 52, Iss. 5. P. 583-592. DOI: 10.1134/S1063784207050088
4. Shakhmatov E.V., Zhuravlev O.A., Komarov S.Yu. Investigation of acoustic excitation of a membrane in a gas flow. *Proc. X International Scientific and Technical Conference «Optical methods of flow investigation»*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2009. P. 480-483. (In Russ.)
5. Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Ivchenko A.V., Kondrashov Yu.I. Vizualizatsiya struktury potoka gaza pri razuprochnenii klapanа. *Proc. XII International Scientific and Technical Conference «Optical methods of flow investigation»*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publ., 2013. (In Russ.)
6. Zhuravliov O.A., Komarov S.Yu., Makaryants G.M., Sergeev R.N., Harchikova Yu.V. Investigation of resonant oscillations working plates in experimental models of pneumatic valve. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3 (27), part 3. P. 363-369. (In Russ.)
7. Jones R., Wykes K. *Holographic and speckle interferometry*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. 353 p.
8. Vest Ch.M. *Holographic interferometr*. New York: John Wiley, 1979. 465 p.
9. Volkov I.V. Using of holography and speckle interferometry for measuring full-scale construction. *Computer Optics*. 2010. V. 34, no. 1. P. 82-89. (In Russ.)
10. Zhuravliov O.A., Shaposhnikov Yu.N., Sheglov Yu.D., Komarov S.Yu., Zhuzhukin A.I., Ivchenko A.V., Sergeev R.N. The Noise Proof Digital Speckle Pattern Interferometer for Vibration Modes. *International Conference on Applications for Image based Measurements (ICAIM)*. 2012.
11. Shakhmatov E.V., Zhuravlev O.A., Sergeev R.N., Safin A.I. Development and application of mobile digital speckle interferometer for vibrometer model sample honeycomb. *Procedia Engineering*. 2015. V. 106. P. 247-252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.031