

Ф.В.Паровой, В.Э.Куклев

ИССЛЕДОВАНИЕ УТЕЧЕК ГАЗА
ЧЕРЕЗ КОНТАКТНЫЕ РАДИАЛЬНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ КРИОГЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Уплотнения агрегатов криогенных систем работают в условиях низкой температуры и сухого трения. Обеспечение работоспособности таких уплотнений, применяемых в агрегатах с возвратно-поступательным перемещением деталей для герметизации газов или жидкостей с малой вязкостью, требует назначения минимального уровня контактного давления [1]. Целью представленных ниже исследований является определение зависимости расхода газа через зону контакта уплотнительных поверхностей от контактного давления.

Характер контактирования уплотнительных поверхностей может быть представлен следующим образом. до приложения нагрузки их микровыступы соприкасаются без деформации. При сближении поверхностей под нагрузкой происходит частичная деформация микронеровностей и в контакт вступают новые участки профиля. Сумма всех фактических площадок касания составляет фактическую площадь контактирования F_{ϕ} . Для рассматриваемых уплотнений, в которых контакт происходит между твердой стальной поверхностью и полимерной оболочкой уплотнительного кольца, а сила трения ограничена, можно принять, что относительная площадь касания \bar{F} , равная отношению F_{ϕ} к полной площади контактирующих поверхностей, пропорциональна отношению контактного давления q_k к твердости поверхности полимерной оболочки уплотнительного кольца [2]:

$$\bar{F} = \frac{q_k}{HB} \quad (1)$$

В расчетной модели зона контакта уплотнительных поверхностей представляет собой пористый слой, толщина которого h и проницаемость K . На основании анализа профиллограмм контактирующих поверхностей уплотнения принимаем, что они имеют одинаковые микронеровности. При расчете характеристик пористого слоя микронеровности считаем усеченными конусами, высота которых R_x , диаметры оснований S и вершин $0,1S$. Известно [3], что проницаемость в большей степени зависит от величины микронеровностей, чем от их формы. Проведенные расчеты зависимости сближения поверхностей от контактного давления при

$$U_n = U_B + \varphi U_M, \quad (6)$$

где U_n, U_M - массовые расходы через единицу длины периметра уплотнения при промежуточном и молекулярном режимах течения; φ - коэффициент, изменяющийся при переходе от вязкостного течения к молекулярному от 0,81 до 1,0. В практике расчетов его принимают равным 0,9 с погрешностью менее 10%.

Расход при молекулярном течении будет

$$U_M = \frac{4}{3} \frac{hk}{B} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (P_1 - P_0), \quad (7)$$

где M - молекулярная масса газа.

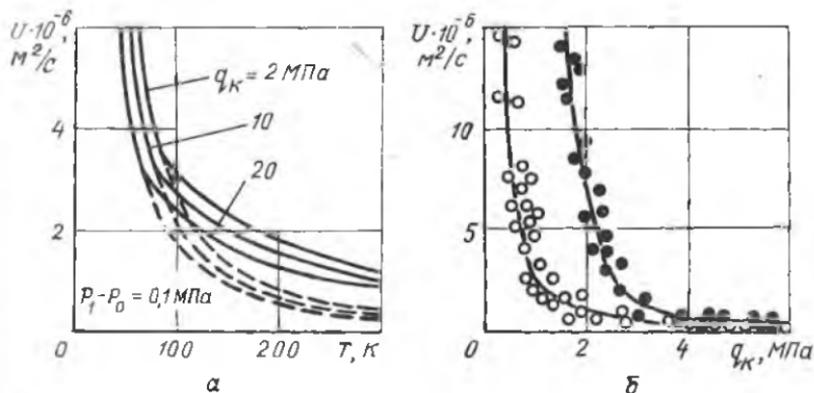
Зависимость расхода газа через уплотнение от температуры обусловлена изменением, с одной стороны, свойств газа, с другой - параметров пористого слоя. Свойства газа в расчетной модели определяются длиной свободного пробега его молекул λ и вязкостью μ . Изменение λ и k вызвано температурными деформациями микронеровностей и ростом твердости материала оболочки при снижении температуры. Поскольку температурные деформации материалов контактирующих поверхностей различаются, а высота их микронеровностей условно принята одинаковой, зависимость высоты пористого слоя от температуры можно записать в виде

$$h(T) = R_z (2 + \varepsilon_{00}^T + \varepsilon_K^T) \left[1 - 2 \sqrt{\frac{q_K}{\pi H V(T)}} \right], \quad (8)$$

где ε_{00}^T , ε_K^T - относительные температурные деформации материалов оболочки и контактирующей поверхности.

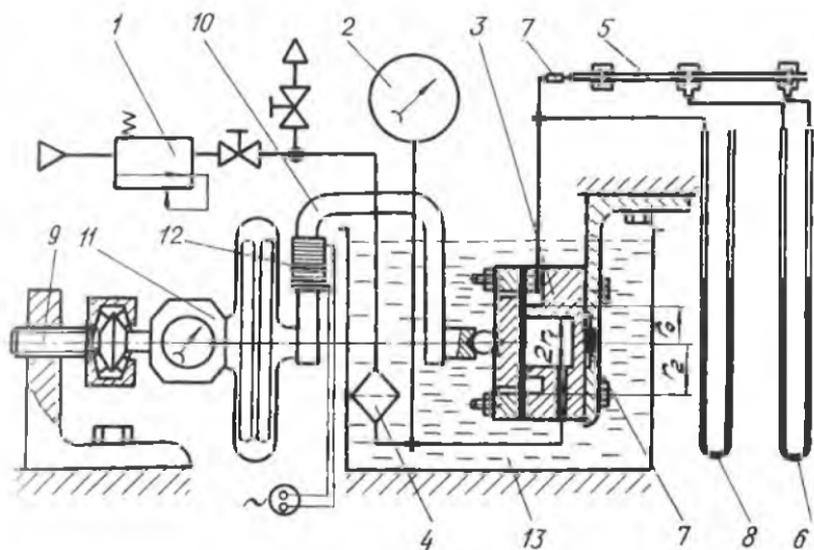
Снижение температуры вызывает увеличение расхода газа через уплотнение, что связано с уменьшением вязкости μ и средней длины свободного пробега его молекул. Результаты расчетов утечек через уплотнение по зависимостям (2) - (8) представлены на рис. 3 в виде графиков.

Экспериментальную проверку разработанной методики проводили на установке, показанной на рис. 4. При этом определяли расход газа в торцовом стыке между двумя плоскими поверхностями, параметры которых были аналогичны параметрам соответствующих поверхностей уплотнения. Газ при постоянном давлении подавали в полость 3 имитатора через фильтр-ловушку 4 [5]. Объемный расход определяли по показаниям водяно-



Р и с. 3. Зависимости расхода газа (гелия) от температуры при постоянных q_k и $\Delta P = 0,1$ МПа (а) и от контактного давления (б):

- - - - без учета молекулярного течения;
- - экспериментальные значения при $T = 293$ К;
- - то же при $T = 77$ К



Р и с. 4. Схема экспериментальной установки для исследования зависимости расхода газа от контактного давления: 1-редуктор; 2-манометр; 3-имитатор; 4-фильтр-ловушка; 5-расходомер; 6, 8-пьезометры; 7-термочувствительный элемент; 9-нагрузочный винт; 10-хомут; 11-динамометр; 12-нагреватель; 13-емкость

го пьезометра 6 расходомера 5. Температуру газа контролировали термочувствительными элементами 7 типа ИС-545А. Контактующие поверхности имитатора прижимали при помощи винта 9 через хомут 10 и динамометр 11.

В ходе исследований находили зависимость расхода газа от контактного давления при температуре 293 и 77 К (соответственно в нормальных условиях и при охлаждении кипящим азотом). Эквивалентность между расходом газа в имитаторе и цилиндрическом зазоре при одинаковых условиях определяли по зависимости

$$M_{\text{И}} = M_{\text{З}} \frac{v_n(r_0/r_1)}{2\pi r_0}$$

Здесь $M_{\text{З}}$, $M_{\text{И}}$ - объемные расходы газа соответственно в имитаторе и в цилиндрическом зазоре, принятом в расчетной модели; r_1 , r_0 - радиусы входной и выходной полостей имитатора.

Экспериментальные значения расхода газа при температуре 77 и 293 К, приведенные к цилиндрическому зазору, показаны на рис. 3,6. Удовлетворительное совпадение результатов экспериментов и расчетов подтверждает возможность использования предложенного подхода для расчета герметичности радиальных подвижных уплотнений, работающих при низкой температуре. Для рассматриваемых уплотнений целесообразно выдерживать контактное давление около 2,5 МПа при $T = 77$ К. Увеличение давления выше этого уровня приводит к незначительному улучшению герметичности при быстром росте трения и износа уплотнительных поверхностей.

Библиографический список

1. Черский И.Н., Мороз В.А. Проектирование и оптимизация радиальных уплотнений // Узлы трения на основе полимеров для низких температур. - Якутск: ИФТИС Якутского филиала СО АН СССР, 1981. - С.18-37.
2. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем / В.Т.Бабкин, А.А.Зайченко, В.В.Александров и др.-М.: Машиностроение, 1977. - 120 с.
3. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с.
4. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. - М.: Машиностроение, 1982. - 216 с.

5. А.с. № 1280358 СССР, МКИ С01М03/02. Стенд для криогенных испытаний уплотнений на герметичность / В.А.Борисов, Ф.В.Паровай, В.Э.Кулев и др. - Оpubл. 30.12.1986; Бюл.№ 48 // Открытия. Изобретения. - № 3936534; Заявл. 6.08.1985.

УДК 621.643.4

И.С.Ракитина, А.А.Сидоренко, Ф.С.Хусаинов

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ И СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ГТД

В турбопроводных коммуникациях современных ГТД и летательных аппаратов широко применяются гибкие металлические рукава (ГМР) и сильфонные компенсаторы (СК), имеющие в качестве герметизирующего элемента металлическую гофрированную оболочку - сильфон [1]. Постоянным сопутствующим фактором эксплуатации ГМР и СК является вибрация, уровень которой во многом зависит от рассеяния энергии в этих элементах.

Для решения нелинейных задач динамики рукавов и компенсаторов необходимо знать статические упругофрикционные характеристики ГМР, а также амплитудно-частотные характеристики и зависимость декремента колебаний σ от амплитуды колебаний СК.

Упругофрикционные характеристики ГМР определяли из петель гистерезиса (рис.1), полученных экспериментально при статическом циклическом деформировании рукава на специальном стенде.

Экспериментальные линии первого нагружения удовлетворительно аппроксимируются зависимостью [2]

$$Q = [A + B/q^S]q, \quad (1)$$

где Q - сила, приложенная к ГМР; q - перемещение ГМР; S - постоянная; A и B - параметры.

Р и с. 1. Зависимость между усилием и перемещением за цикл нагружения: 1-линия первого нагружения; 2-разгрузка; 3 - нагрузка

