

9. G. Scherer-Abreu, R.A. Abreu Numerical modelling of the molecular and transitional flow regimes in vacuum components //Vacuum. 1995. Vol. 46. №. 8-10. 863-866 pp.

10. S. Giors et al. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2006. Vol. 24. №. 4. 1584-1591 pp.

11. V. I. Tokmantsev, V. D. Seleznev The direct jumping of molecules through the compression of gas centrifuge //Vacuum. 2014. Vol. 109. 349-353 pp.

12. R. Versluis et al. Numerical investigation of turbomolecular pumps using the direct simulation Monte Carlo method with moving surfaces //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2009. Vol. 27. №. 3. 543-547 pp.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОГРЕВАЕМЫХ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

THE EVOLUTION OF IDEAS FOR IMPROVING HEATED ULTRA-HIGH VACUUM SWITCHING DEVICES

А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков / aev241@yandex.ru, vyazovetskov@rambler.ru

A.E.Vyazovetskova, V.V.Vyazovetskov

ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Анализируются известные предложения по повышению качества сверхвысоковакуумных коммутационных разъёмных устройств. Основной тенденцией развития сверхвысоковакуумных разъёмных соединений принята концепция повышения вакуумной плотности узлов герметизации в процессе многократного термоциклирования. Обсуждаются модельные представления контактных взаимодействий в процессах герметизации и термоциклирования разъёмного соединения. Указываются конструктивные особенности выполнения рекомендуемых коммутационных устройств.

The well-known proposals for improving the quality of ultra-high vacuum switching disconnectable devices are analyzed. The main trend in the progress of ultra-high-vacuum detachable joints is the accepted concept of increasing the vacuum density of sealing units in the process of multiple thermal cycling. Model representations of contact interactions in the processes of sealing and thermal cycling of a detachable joint are discussed. The design features of the recommended switching devices are indicated.

Ключевые слова: *разъёмные соединения, сверхвысокий вакуум, контактные взаимодействия, герметизация, термоциклирование.*

Ключевые слова: Key words: *joints, ultra-high vacuum, contact interactions, sealing, multiple thermal cycling.*

Успешная эксплуатация вакуумных систем всегда определяется возможностью обеспечения герметичности коммутационных устройств (фланцевых соединений и клапанов). Наличие течи в сверхвысоковакуумной системе приводит к сорбции атмосферных газов на внутри камерных поверхностях с малой зависимостью от расположения и параметров средств откачки. Влияние сорбированного газа обязательно

проявляется на величину предельного вакуума и в резком повышении давления при энергетическом воздействии на камеру (поднятии тока заряженных частиц в ускорителях, в процессе образования плазменного шнура в термоядерных установках). Для сверхвысоковакуумных комплексов поиск и ликвидация появившегося натекания ведёт к большим временным и материальным затратам.

В современном справочнике [1, с.411] указывается, что соединения “conflat” удовлетворительны лишь до диаметров 12 дюймов. В качестве альтернативы для больших проходных сечений предлагается опробовать соединение типа Helicoflex с целью приобретения опыта до принятия окончательного решения об использовании в рамках крупного проекта [1, с.408, 411- 412]. В одной из последних публикаций [2] отмечена потеря герметичности соединения « conflat» с проходным сечением Ду 250 мм при нагружении вакуумпровода сравнительно небольшим моментом - 8 кН·м. Конструкция типа «Helicoflex» с проходным сечением Ду 528 мм имела повышенное значение потока натекания ($>1 \cdot 10^{-10}$ л·мбар/с). Была рекомендована известная деформационная схема с упругим С-образным уплотнителем, покрытым пластичным покрытием и установленным между полированными герметизирующими поверхностями фланцев [3, с.259].

Совершенствование конструкций фланцевых соединений проводилось в СССР с целью замены надёжных канавочно-клиновых соединений на более компактные устройства с меньшими усилиями герметизации [4-6]. О.К.Курбатов замечает, что ГОСТ 26526-85 на сверхвысоковакуумные разъёмные соединения типа «conflat» принят по технико-политическим соображениям [6, с.27]. Экспериментально установлено, что эти соединения с проходными размерами Ду 250 мм оказались ненадёжными в условиях термоциклирования [6, 7]. Исследование различных конструкций фланцевых соединений на герметичность в процессе термоциклирования показало, что более надёжными оказались соединения со встречными канавками [5 - 7]. Данные компактные устройства, разработанные для условных проходов не более 200 мм, были приняты в качестве стандарта НИИВТ имени С.А.Векшинского (СТП «Сверхвысоковакуумные фланцевые соединения»).

При малом наклоне герметизирующих поверхностей возможно сохранение некоторой плотности контакта при полном снятии внешнего усилия за счёт эффекта клина [8, с.153]. Усилие герметизации следует выбирать завышенным для выхода зависимости потока натекания от усилия герметизации на плато. Тогда при ползучести уплотнителя или поводках герметизирующих элементов запасённая энергия поддерживает вакуумно-плотное контактирование герметизирующих элементов [9 - 11].

Высокая чувствительность тонкой плёнки пластичного уплотнителя к малейшим перекосам герметизирующей поверхности, к радиальным рискам и другим дефектам на уплотняющей поверхности отмечалась в ранней обзорной работе [12, с.42]. Вакуумная плотность соединения снижается при попадании в зону герметизации частиц пыли [13] или в случае коробления герметизирующих поверхностей после термоциклирования соединения [14]. Изготовление и ремонт такой деформационной схемы требует высокоточного специализированного оборудования. Работоспособность таких клапанов с условными проходами Ду 400 мм и более является проблематичной. Поэтому большее внимание уделялось разработке узлов герметизации с толстым уплотнителем, выполняемых по традиционным технологиям.

Известны публикации, посвященные изучению зависимости величины потока натекания от усилия герметизации без выдачи конкретных рекомендаций выполнения устройств [15 - 18]. Большое влияние на вакуумную плотность герметизируемого соединения оказывают трудно контролируемые огрехи изготовления или поводок герметизирующих поверхностей, окисление уплотнителя, попадание пыли в зону герметизации, небрежность монтажа. Обосновать выбор рекомендуемых схем на основе анализа способности различных деформационных схем заполнять зазор между герметизирующими поверхностями возможно посредством теоретического анализа процесса деформации материалов.

Метод верхней оценки процесса деформации материалов основан на принципе наименьшего действия, описанного Пьером Мопертьюи и Леонардом Эйлером в середине 18 века для перемещения материальной точки. Деформационные потоки будут распространяться по области, в которой затраты на преодоление энергии связи вдоль будут минимальными. В отличие от исходного метода верхней оценки [19, 20] нами уточняются кинематические возможные поля скоростей перемещений следующими дополнениями [21]:

- постулируется принцип предпочтительного движения частиц (энергии), согласно которому перемещение материала на свободную поверхность обязательно произойдёт при достижении достаточный условий;
- рассеяние мощности на границе жестко пластичной зоны деформации определяется касательной и нормальной составляющих скоростей;
- расчёт потерь мощности потока скоростей учитывает не только потери по границам жёстких областей, но общую площадь деформированной зоны с задаваемой в ней скоростью.

Определение наиболее вероятного поля перемещения материала уплотнителя оценивалось минимизацией значений функционала J , рассчитываемого системой уравнений:

$$\begin{cases} \vec{\Pi}_{вх} l_{вх} = \sum_{kзеп}^g \vec{\Pi}_{kзеп} l_{kзеп} + \sum_{iзр}^n \vec{\Pi}_{iзр} l_{iзр} + \sum_{тсв}^q \vec{\Pi}_{тсв} l_{тсв} \\ J = \min_{1...m} \left\{ \sum_{i=1}^r \vec{V}_j \cdot S_i \right\}, \end{cases}$$

где $\vec{\Pi}_{вх}, \vec{\Pi}_{кзеп}, \vec{\Pi}_{iзр}, \vec{\Pi}_{тсв}$ - значения удельных потоков полей скоростей перемещения соответственно на границе входа в деформируемую область материала уплотнителя, через $kзеп$ герметизирующую поверхность, через $iзр$ внутреннюю граничную разрывную поверхность, на $тсв$ свободную поверхность;

$l_{вх}, l_{кзеп}, l_{iзр}, l_{тсв}$ - длины границ поверхности входа энергетического потока, к герметизирующей поверхности, i внутренней граничной разрывной поверхности, m свободной поверхности;

\vec{V}_j, S_j - скорость и площадь жёсткого перемещения материала в j треугольнике;

g, n, q – соответственно количество герметизирующих поверхностей, внутренних граничных разрывных поверхностей, свободных поверхностей через которые выходит перемещаемый материал.

m, r – числа вариантов кинематически возможных полей и количества жёстких блоков в каждом варианте

Величина поворота потока перемещаемого материала зависит от энергии связи элементарных ячеек, выраженной в величине напряжения сдвига, а также от направления и величины входящего энергетического потока. На рис.1 а представлен случай перемещения приповерхностного материала уплотнителя по нормали без достижения вакуумной плотности контакта герметизирующих поверхностей. Такая ситуация типична при большой энергии связи контактируемых твёрдых материалов. Другой случай перемещения входящего потока, но направлению близкого к нормали, возникает на некотором цикле герметизации соединения при увеличении зоны силового контакта. Тогда поворот энергетического потока вдоль приповерхностной области для касательного смещения поверхностного слоя становится более затратным по сравнению с его распространением по глубинному пространству материала уплотнителя. Вакуумная плотность соединения заметно не повышается, развивается объёмная деформация уплотнителя. Дальнейшее увеличение усилия приводит к ещё большему перемещению

энергетического потока в уплотнитель, не улучшая вакуумную плотность контакта. Приходится разбирать соединение и удалять отработанный слой уплотнителя.

Особенности перемещения поверхностного слоя толстого уплотнителя поясняются схемами на рис. 1, где большими вертикальными стрелками условно показано направление прикладываемого усилия и маленькими стрелками направление смещения поверхностного слоя уплотнителя.

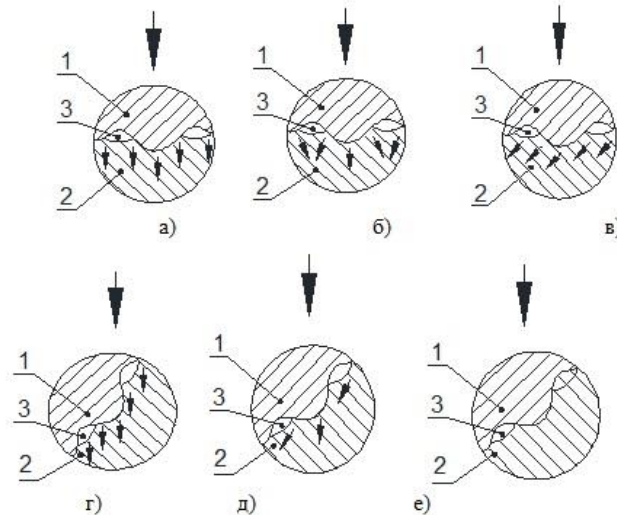


Рис.1. Схемы перемещения материала уплотнителя на микроучастках силового взаимодействия по плоской (а, б, в) и наклонной герметизирующей поверхности (г, д, е): 1-герметизирующий элемент, 2- пластичный уплотнитель, 3- зазор между герметизирующим элементом и уплотнителем.

Снижение энергии связи в материале уплотнителя способствует повороту перемещаемого в нём приповерхностного материала, показанному на рис.1б. Краевой эффект вынужденного касательного перемещения приповерхностного слоя пластичного уплотнителя наглядно демонстрировался на конференциях [10]. На рис. 1 в показано касательное перемещение поверхностного слоя пластичного уплотнителя, способствующее большей заполняемости зазоров между герметизирующими поверхностями.

При малом угле наклона герметизирующей поверхности и отсутствии силового противодействия подложки возможно касательная деформация поверхностных слоёв без достаточного заполнения зазоров между герметизирующими поверхностями. Именно такое взаимодействие описано в работе [8] и условно показано на рис. 1 г.

Более эффективным заполнением зазора между герметизирующими поверхностями является использование краевого эффекта для наклонной герметизирующей поверхности условно показанных на рис. 1 д. Радиальное взаимодействие герметизирующих поверхностей способно сохранять вакуумную плотность при снижении прикладываемых усилий герметизации.

Запирание края наклонного участка по его границам в наибольшей мере герметизирует соединение и препятствует перемещению уплотнителя [22, 23], что и отражено на рис. 1 е. Испытания на герметичность при комнатной температуре опытных образцов с проходными отверстиями Ду 10 - 250 мм выявили их высокую вакуумную плотность с величиной потока натекания, находящейся за порогом чувствительности течеискателей ($< 10^{-11} \text{ м}^3\text{Па/с}$).

Для прогреваемых сверхвысоковакуумных клапанов с дистанционным управлением рекомендуется деформационная схема с «волочением» уплотнителя [24]. Высокая герметичность соединения и сохранение площади изменяемого герметизирующего контакта (исключением валика перед зоной взаимодействия)

осуществляется при выборе геометрических соотношений герметизирующих элементов, приведённых на рис.2.

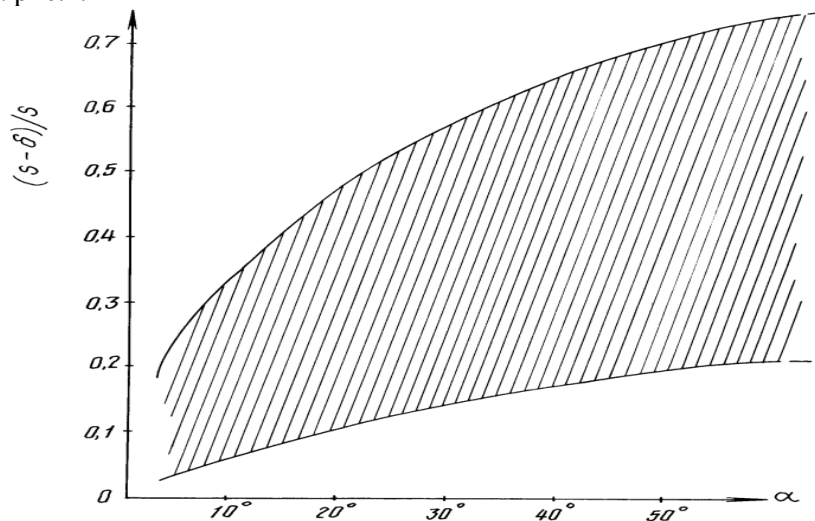


Рис.2. Рекомендуемая область выполнения герметизирующих элементов в деформационной схеме с волочением уплотнителя: α - угол наклона герметизирующей поверхности, s -первоначальная толщина кольцевого уплотнителя, b – толщина отработанного уплотнителя, $(s - b) / s$ – обжатие уплотнителя.

Испытания макетного образца Ду 46 мм с медным уплотнителем и углом наклона герметизирующей поверхности в 20° на герметичность при комнатной температуре показали его высокую вакуумную плотность при полном снятии внешнего усилия.

Настоятельно рекомендуется новый способ управления клапанами, повышающий надёжность герметизации, цикличности срабатывания и удобства контролирования проведения технологического процесса [25].

При разработке больших коммутационных устройств можно использовать уплотнитель, выполненный из термостойкого эластомера и покрытый со стороны вакуумной системы плёнкой индия или серебра. Вариант выполнения такого узла герметизации для малого проходного сечения показан в работе [26].

Проведённая работа позволила сделать следующие выводы:

1. Основным направлением совершенствования сверхвысоковакуумных коммутационных устройств выбрано поддержание их работоспособности в условиях многократного термоциклирования. Формализована природа отказа работоспособности прогреваемого разъёмного соединения. В качестве сравнительного критерия работоспособности устройства выбрана величина напряжения, необходимая для ухода материала уплотнителя из участка герметизации соединения.

2. Разработанный модифицированный метод верхней оценки деформации упруго-пластичного материала позволяет сравнивать условия контактных взаимодействий герметизирующей поверхностей различных деформационных схем.

3. Определены конструкции узлов герметизации, достаточные для устойчивого воспроизведения условий вакуумно-плотного взаимодействия герметизирующих элементов соединения в процессе его многократного термоциклирования. Сконструированы, изготовлены и успешно испытаны на герметичность при комнатной температуре опытные образцы с деформационными схемами для фланцевых и клапанных соединений.

4. Многолетнее отсутствие финансирования разработок нового поколения сверхвысоковакуумного коммутационного оборудования является характерным показателем наступившего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Справочник по вакуумной технике и технологиям», под ред. Д.Хоффмана, Б. Сингха, Дж.Томаса Ш. Перевод с английского под редакцией В.А.Романько, С.Б.Нестерова. М. «ТЕХНОСФЕРА», 2011, – 736 с.
2. В.В.Анашин, А.А.Краснов, А.М.Семёнов, С.Р.Шарафеева «Вакуумно-плотные соединения для получения сверхвысокого вакуума в вакуумных системах ускорителей с широкоапертурными камерами», ПТЭ. 2019 № 5,134-135.
3. Дж.Фр.Уэстон «Техника сверхвысокого вакуума»,- М.- «Мир», 1988. -366 с.
4. А.С.Шувалов, Н.В.Бублик, А.В.Балицкий, Л.А.Филатовский «Высоковакуумные фланцевые соединения с серповидным уплотняющим профилем», ПТЭ, 1972, № 4, с.174 – 175.
5. Л.А.Филатовский, А.С.Шувалов, О.К.Курбатов, С.Д.Васильченко «Новые малогабаритные сверхвысоковакуумные фланцевые соединения», Электронная техника, Серия ТОПО, 1982, вып.3 (112), с.62-64.
6. О.К.Курбатов «Физико-технические основы оптимизированных высоковакуумных магниторазрядных насосов, герметизирующих элементов и устройств для вакуумного технологического и аналитического оборудования электронной техники», Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук, Москва, 2006.
7. А.С.Шувалов «Соединительные элементы сверхвысоковакуумных систем». Вакуумная техника и технология, 1994, т.4, № 4, с.2-25.
8. В.В.Вязовецков «Экспериментальные результаты исследования герметизации сферических пар». Межвузовский сборник «Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП», М.1984 г., с.149-155.
9. В.В. Вязовецков «Коммутационные устройства с радиальной герметизацией», Тезисы докладов научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Гурзуф, 1999 г., с.35- 36.
10. А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков «Формирование вакуумной плотности в сверхвысоковакуумных прогреваемых разъёмных соединениях», материалы XIV международной научно-технической конференции, М. КВЦ «Сокольники», 2019, 16-17 апреля, с.69-73.
11. Д.Б.Зворыкин «Вопросы расчёта и конструирования цельнометаллических высоковакуумных систем и их элементов». Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. НИИ МРТП, М.1955.
12. Б.С.Данилин «Металлические вакуумные установки. Пособие по курсу Основы электровакуумной технике.» Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт. Кафедра электровакуумной техники. М. 1958 . - 191с.
13. Kenjiro Obara, Tetsuys Abe, Yoshio Murarami, Masahiro Yamamoto, Masatsugu Shimizu, Kiyoshy Chiba and Kazuo Itoh “Development of All Metall Gate Valve for JT-60 Diagnostic Port (I), (II)”, Journal of the vacuum Society Japan, 1983 , V.26, N 5,p. 435-444.
14. В.В.Вязовецков, В.Л.Орлов, Н.И.Столяров «Выбор материала и испытания уплотнительных пар типа сталь-сталь для плоских затворов». Тезисы докладов научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Гурзуф 1994 г., с.156.
15. J.P. Boulloud, J. Schweitzer «Etude expérimental de joits métalliques pour ultra-vide», Vide, 1959, № 82.-Juillet-Août, pp.241-249.
16. Forrest O., Ratbun J. “Metal-to-Metal and Metal-Gasketed Seal for extreme environment applications”, Machine design, AUGUST 5, 1965, v. 37, N 18, p.158 - 168.
17. С.Н. Домрачёв, В.Я. Моисеев, Г.Л. Саксаганский «Конструирование разъёмных вакуумных соединений с металлическими уплотнителями.» Электронная техника, серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1975 г., с.67 – 74.
18. A.Rot “Sealing mechanisms in bakeable vacuum seals” The Journal of Vacuum Science & Technol. A1 (2), Apr-June 1983, p.211-219.

19. Hill R. On the State of Stress in a Plastic-Rigid Body at the Yield Point, Phil. Mag. 42, 1951, p.868.

20. Green A.P. A Theoretical Investigation of the Compression of a Ductile Material between Smooth Flat Dies, Phil. Mag.42, 1951, p.900.

21. А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков «Оценка герметизации деформационных схем разъемных цельнометаллических соединений модифицированным методом верхней оценки кинематических полей скоростей». /Материалы XX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». М.МИЭМ.2013, с.97 - 100.

22. А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков «Энергетические аспекты повышения надёжности герметизации сверхвысоковакуумных коммутационных устройств», материалы XII международной научно-технической конференции, М. КВЦ «Сокольники», 2017, 11-13 апреля, с.70-85.

23. Патент на изобретение RU № 2573 081 С2 «Канавочно-клиновое уплотнительное соединение» Авторы: А.Е.Вязовецкова, В.В. Вязовецков. Опубликовано: 20.01.2016 г. Бюл. № 26, 2916 г.

24. В.В.Вязовецков «Вопросы конструирования сверхвысоковакуумных клапанов с деформируемым уплотнителем». Межвузовский сборник «Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП». М.1986г.,с. 81-86.

25. Патент на изобретение № 2348851 Российской Федерации «Способ дистанционного управлением клапаном варианты» / В.В. Вязовецков. – Опубликовано 10.03.2009 г., Бюл. № 7, 2009 г.

26. Г.А.Гусев «Высоковакуумные разъемные сочленения многократного использования», ПТЭ, № 2, 1974, с.169-170.