

3. Лозован А.А., Якубов Р.Х и др. Исследование пробоя по поверхности тонкого диэлектрика в вакууме // Вакуумная техника и технология. Труды 21-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 17 июня - 19 июня 2014 г. Под. ред. А.А. Лисенкова. – СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, – 206 с.
4. Большая советская энциклопедия. Слюды. Марфунин А.С., Петров В.П./ гл. ред. Прохоров А.М.. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978, т.23.
5. Бушин С.А. Методика и установка для финишного контроля герметичности газонаполненных разрядников //Материалы восемнадцатой научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". Судак, 2011.
6. Результаты опытной эксплуатации вакуумной автоматизированной установки контроля герметичности разрядников //Вакуумная техника и технология, т. 23 (вып.1), Санкт-Петербург, 2014. - с.39-41.
7. Bushin S.A., Kozlovskaya T.I. Automated equipment for final leak tightness inspection of miniature gas-filled instruments //Proc. 15th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT2017), 13-17 november 2017, Singapore, published at NDT.net (http://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/31_Bushin_Rev4.pdf).
8. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике.– М.:Советское радио, 1967.- с.408.
9. Fedorova S.V.. Physical and chemical and electric indicators of the micalex // IS Journal Theoretical & Applied Science 04(24), 2015, p.145-148.

Разработка конструкций сверхвысоковакуумных прогреваемых крупногабаритных коммутационных устройств повышенной надёжности герметизации

А.Е.Вязовецкова, В.В.Вязовецков

Москва, НИЦ «Курчатовский институт», пл. Курчатова, 1

E-mail: aev241@yandex.ru, vyazovetskov@rambler.ru

Указаны причины, препятствующие созданию и сохранению герметизации в разъёмных сверхвысоковакуумных соединениях. Разработаны новые конструкции крупногабаритных фланцевых соединений, клапанов и затворов для эксплуатации в условиях термоциклирования и силового воздействия. Устройства отличаются минимальным газовыделением в вакуумную систему, повышенным ресурсом, технологичностью и удобством обслуживания.

Development of designs for ultrahigh-vacuum heated large-size switching devices with enhanced sealing reliability. A.E.Vyazovetskova, V.V. Vyazovetskov. The reasons that prevent the creation and preservation of the sealing in sectional ultrahigh-vacuum connections are indicated. New designs of large-sized flanged connections, valves and lock valves for operation in conditions of thermal cycling and power action are developed. The devices are characterized by minimal gas evolution into the vacuum system, increased service life, manufacturability and serviceability.

Несмотря на высокую «стоимость отказа» и низкую надёжность прогреваемых сверхвысоковакуумных крупногабаритных коммутационных устройств (фланцев, клапанов и затворов) новых разработок этого оборудования не наблюдается в течение десятилетий. Такое положение объясняется сложностью задач и отсутствием рекомендаций выполнения сверхвысоковакуумных коммутационных устройств.

Целью доклада является указание принципиальных конструкторских решений, увеличивающих надёжность герметизации и удобство эксплуатации крупногабаритных прогреваемых сверхвысоковакуумных фланцевых соединений, клапанов и затворов.

В СССР наибольшее распространение имели надёжные канавочно-клиновые фланцевые соединения [1]. Появление ГОСТ 26526-85 на фланцевые соединения объяснялось растущим международным сотрудничеством и необходимостью стыковки вакуумных систем с зарубежным оборудованием. Тогда большинство фирм выбрали в качестве стандарта соединение, разработанное американской фирмой Varian [2].

В нашем институте отдельные попытки прогреть такое соединение с проходным сечением Ду 250 мм оказались неудачными. Низкая надёжность соединений типа Conflat с проходными сечениями Ду 250 мм и более отмечалась в работах [3, 4, 5]. Потребности стыковки к таким соединениям тяжело нагруженных вакуумпроводов привели к необходимости реконструкции всего узла герметизации. На рис. 1а и 1б показан вариант решения данной задачи, применительно к соединению Ду 250 мм [6].

Размещение жёсткого центрирующего кольца 6 со стороны атмосферы 2 относительно герметизирующих выступов 4, 10 позволяет, не меняя конструкцию фланца 3 значительно облегчить монтаж соединения и улучшить условия обезгаживания полости фланцевого соединения. Для больших размеров проходных сечений жёсткое кольцо можно использовать в качестве несущего элемента вакуумпровода и для юстировки магистралей в ускорителях заряженных частиц. Наличие упругого элемента 13 в механизме герметизации 14 является необходимым элементом в любом прогреваемом сверхвысоковакуумном разъёмном соединении.

В процессе создания основной конструкции крупногабаритного фланцевого соединения за основу было решено взять отечественную разработку канавочно-клинового соединения (тип III), отличающегося, как уже указывалось, высокой надёжностью герметизации [1]. Большие радиальные размеры обусловлены наличием упругой механической развязки между вакуумпроводом и собственно фланцем, а также использованием силовой схемы с упругим контактирующим верхним фланцем. При этом эксплуатационные нагрузки, прикладываемые к разъёмному соединению, понижаются упругой развязкой и частично перекладываются из зоны герметизации на периферию массивного нижнего фланца.

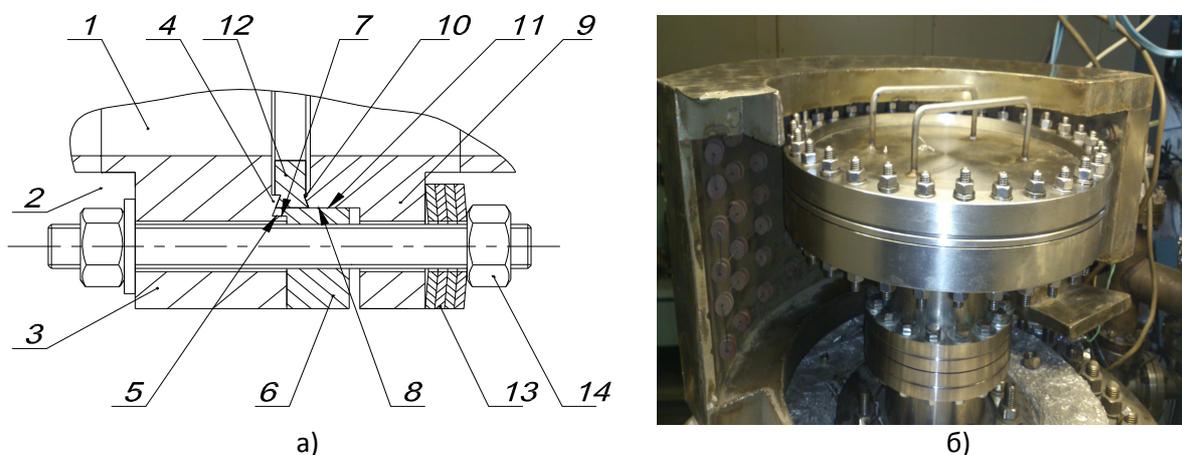


Рис. 1. Вариант конструкции узла стыковки к стандартному фланцу Ду 250 мм:
а – конструктивное выполнение узла стыковки, б – общий вид соединения. 1 – объём вакуумируемый, 2 – атмосфера, 3 – стандартный фланец, 4 – герметизирующий выступ, 5 – центрирующая поверхность фланца, 6 – жёсткое центрирующее кольцо, 7 – центрирующая поверхность жёсткого кольца, 8 – посадочная поверхность жёсткого кольца, 9 – ответный фланец, 10 – герметизирующий выступ ответного фланца, 11 – посадочная поверхность ответного фланца, 12 – уплотнитель, 13 – упругие элемент в виде тарельчатых пружин, 14 – узел стягивания соединения.

На рис. 2 показана деформационная схема зоны герметизации варианта модернизированного канавочно-клинового соединения [7]. Главной идеей данной схемы является создание узкого участка герметизации между наклонными поверхностями выступа 3 и канавки 7, который с обеих сторон запирается обжатием уплотнителя 11 посредством деформационных выступов 5 и 10. Деформационные выступы могут быть выполнены в различных конструкцион-

ных сочетаниях по границам узкого наклонного участка герметизации с высоким напряжением сжатия.

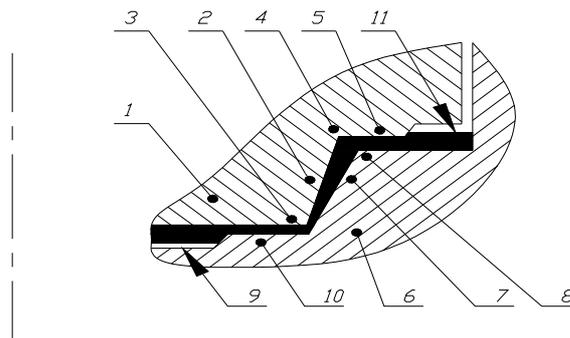


Рис.2. Деформационная схема зоны герметизации канавочно-клинового соединения:
1 - Фланец с клиновым герметизирующим выступом, 2 – клиновидная наклонная герметизирующая поверхность, 3 - герметизирующий выступ, 4- основание наклонной герметизирующей клиновидной поверхности, 5- деформационный выступ, 6 – фланец с герметизирующей канавкой, 7 - наклонная герметизирующая поверхность канавки, 8 –основание канавки, 9 – дно канавки, 10 – деформационный выступ, 11-уплотнитель.

В отличие от исходной конструкции в рекомендуемом исполнении имеется одна зона герметизации вместо двух и отсутствует свободное пространство между зонами. При этом материал уплотнителя запирается более эффективно, что интенсифицирует заполнение канавок микронеровностей герметизирующих поверхностей. В зоне герметизации возникает радиальная упругая составляющая, известная из процессов штамповки. Возможно изменять углы наклона герметизирующих поверхностей и в большей степени использовать эффект гистерезиса натекания. По сравнению с оригиналом снижаются усилия герметизации, габариты и вес устройства.

Нами были успешно испытаны на герметичность при комнатной температуре модернизированные канавочно-клиновые соединения с габаритными размерами и крепежом, соответствующими соединениям типа Conflat на проходные сечения с диаметрами 35 мм, 63 мм и 250 мм, а также штуцерное соединение Ду 10 мм.

В качестве альтернативы для больших проходных сечений предлагается опробовать соединение типа Helicoflex [5, с. 408] с целью «оценить их по мере использования для того, чтобы приобрести опыт до принятия окончательного решения об использовании в рамках крупного проекта» [5, с.411-412]. Важным преимуществом фланцевого соединения Helicoflex по сравнению с большинством конструкций фланцев является освоенные технологии выполнения герметизирующего упругого элемента и герметизирующих плоскостей с большими и некруглыми проходными отверстиями.

Для фланцев с круглыми сечениями проходного отверстия до Ду 750 мм преимущества канавочно-клиновых соединений очевидны. Они герметичнее [8, 9], более стойки к внешним механическим воздействиям, имеется возможность дополнительной подтяжки после поводки поверхностей, сменный уплотнитель значительно дешевле. Изготовление канавочно-клиновых соединений с некруглыми отверстиями потребует специализированного станочного оборудования.

Большинство фирм-производителей серийно выпускают прогреваемые в закрытом состоянии клапаны, деформационная схема которых содержит герметизирующий выступ и массивный медный уплотнитель [10, 11]. Клапаны управляются вручную, имеют ограниченный ряд проходных сечений (не более Ду 63 мм). Величина натекания обычно не более $5 \cdot 10^{-11}$ м³·Па/с. В зависимости от температуры прогрева в закрытом состоянии (450 °С или 250 °С), мастерства оператора и совести производителя наработка на отказ оценивается всего лишь в 50 – 500 циклов.

Прогреваемые сверхвысоковакуумные клапаны и затворы фирмы VAT (серий 47, 48, 54, 57) по фирменному каталогу имеют несколько большую величину натекания ($1 \cdot 10^{-10}$ mbar·l/s), но значительно большее число гарантированных циклов срабатывания (5 000 циклов для

Ду 200 – 320 мм серии 47,48). Клапаны на малые проходные сечения с пневмоприводом имеют повышенный ресурс (до 20 000 циклов). Температура в закрытом состоянии не превышает 300 °С, а в открытом 450 °С. Ограничивается скорость нагрева и охлаждения устройств (~ 60 °С /час).

Данные клапаны значительно дороже, что объясняется применением уникальных материалов и технологий изготовления устройств. Надёжная работоспособность таких устройств на большие проходы (Ду 400 мм и выше) на наш взгляд проблематична. Некоторые испытания на герметичность при термоциклировании показали низкую надёжность таких затворов, авторы указали на необходимость дальнейших поисков новых конструктивных решений [2]. Потеря герметичности затворов с тонкой плёнкой уплотнителя также наблюдалась в работе плоской деформационной схемы [12]. Мы объясняем снижение герметичности таких схем их высокой чувствительностью к возникающим микроповодкам (микророблениям) герметизирующих поверхностей.

Кроме того эти устройства не способны надёжно работать при наличии в вакуумной системе пылеобразных загрязнений [13], что особенно важно для сверхвысоковакуумных комплексов по изучению термоядерных реакций. Известны попытки использования эластичных мембран в затворах с большими проходными отверстиями [14]. Однако изготовление таких затворов также требует достаточно высоких технологий для выполнения герметизирующих поверхностей до зеркального состояния. Проводимость зоны герметизации оказалась велика, поэтому в закрытом состоянии затвора необходимо создать в полости затвора охранный вакуум непрерывно работающим турбомолекулярным насосом.

Учитывая вышесказанное, была предложена конструкция [15], представленная на рис.3. В открытом состоянии затвора полость затвора от сверхвысоковакуумной магистрали перекрывается кольцом запорным 5, газовыделение от эластомерного уплотнителя 8 диска 7 скачивается насосом малой производительности. В закрытом состоянии затвора магистраль перекрывается диском запорным 7, снабженным эластичными герметизирующими выступами с одной или двух сторон 8 диска 7. При односторонней установке эластомерного уплотнителя на запорном диске со стороны атмосферы и наличии откачки полости затвора влияние газовой выделения с поверхности эластичного уплотнителя на магистраль мало. Часто такой поток газовой выделения становится не существенным, так как система работает в другом режиме. Эластомер охлаждается при прогреве затвора. Разъёмный корпус позволяет проводить замену запорных кольца 5 и диска 6 без снятия затвора с вакуумной системы.

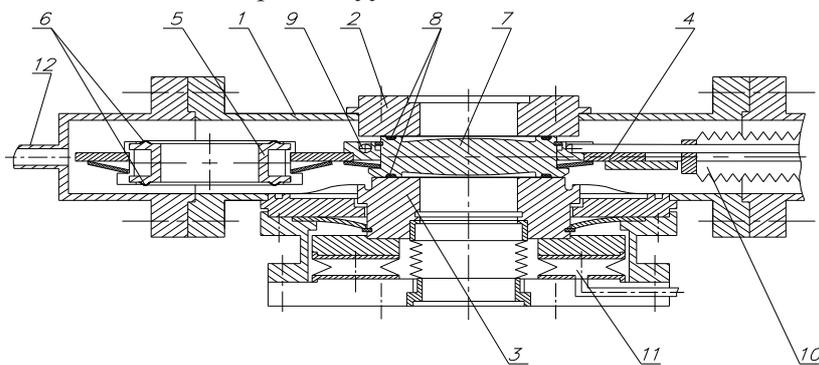


Рис. 3. Конструкция сверхвысоковакуумного прогреваемого затвора:

1 - разъёмный корпус, 2 – неподвижное уплотнительное кольцо, 3 - подвижное уплотнительное кольцо, 4 – разъёмный держатель, 5 – кольцо запорное, 6 – герметизирующие выступы запорного кольца, 7 – диск запорный, 8 – герметизирующие выступы диска запорного, 9 – трубопровод охлаждающий, 10 – механизм перемещения разъёмного держателя с запорным кольцом и диском, 11 - механизм герметизации запорных элементов, 12 – патрубков откачки полости затвора.

Технологическая доступность позволяет изготавливать сверхвысоковакуумные прогреваемые затворы больших проходных сечений (Ду 630 мм и более) с надёжной герметизацией и малым газовой выделением в перекрываемую магистраль. Установка радиационно-стойкого уплотнителя увеличивает область применения таких затворов.

Для создания цельнометаллических клапанов многократно рекомендовалась деформационная схема с «волочением» уплотнителя, обладающая свойствами:

- наличием высокой степени герметичности при сравнительной малости усилий;
- воспроизводимыми величинами площади и усилия герметизирующего взаимодействия в процессе многократного срабатывания;
- наличием ярко выраженного эффекта гистерезиса натекания;
- меньшей зависимостью от микроповодок герметизирующих поверхностей.

Предлагаемые конструктивные решения выполнения сверхвысоковакуумных прогреваемых крупногабаритных устройств отличаются высокой степенью герметизации, повышенной надёжностью многократного срабатывания, удобством обслуживания и не имеют значительных технологических ограничений в изготовлении.

Литература

1. А.В.Балицкий Технология изготовления вакуумной аппаратуры. Изд.3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974. - 312 с.
2. United States Patent Office № 3,208, 758 , Cl. 277-171, Metal vacuum joint, patented Sept, 28, 1965, Maurice A. Carlson and William R. Wheeler.
3. C.L.Foerster and D.McCafferty “Selection and evaluation of ultrahigh vacuum gate valve for ISABELLE beam line vacuum system”. J.Vac.Sci.Technol. April 1981, p.997-1000.
4. А.С.Шувалов «Соединительные элементы сверхвысоковакуумных систем». Вакуумная техника и технология, 1994, т.4, № 4, с.2-25.
5. «Справочник по вакуумной технике и технологиям», под ред. Д.Хоффмана, Б.Сингха, Дж.Томаса III. Перевод с английского под редакцией В.А.Романько, С.Б.Нестерова. М. «ТЕХНОСФЕРА», 2011, – 736 с
6. Патент на полезную модель RU № 169 119 U1 «Сверхвысоковакуумное уплотнительное соединение». Авторы: А.Е.Вязовецкова, В.В. Вязовецков. Опубликовано: 03.03.2017 г. Бюл.№ 7.
7. Патент на изобретение RU № 2573 081 C2 «Канавочно-клиновое уплотнительное соединение» Авторы: А.Е.Вязовецкова, В.В. Вязовецков. Опубликовано: 20.01.2016 г. Бюл. № 26.
8. С.Н. Домрачёв, В.Я. Моисеев, Г.Л. Саксаганский «Конструирование разъёмных вакуумных соединений с металлическими уплотнителями», Электронная техника, серия 4. Электривакуумные и газоразрядные приборы. 1975, с.67 – 74.
9. A. Rot «Sealing mechanisms in bakeable vacuum seals». Journal of Vacuum Science & Technol. A1 (2), 1983, Apr-June, pp.211-219.
10. Howard H.Pattee, “A Demountable Ultra-High Vacuum Joint”, Review of scientific instruments. 1954, v. 25, № 11, pp.1132-1133.
11. Von Hans-Werner Drawin “Ausheizbares Ultra-Hochvakuum-Ventile mit großem Öffnungsquerschnitt”. –Vakuum-Technik, 1960, 9 Jhrg. Heft 7,199 – 201.
12. 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.
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. H.Ishimaru, T.Kuroda, O.Kaneko, Y.Oka and K.Sakurai “All aluminum alloy, 800 mm-inner diameter gate valve using dual flat-face seals together with differential pumping”. Journal of Vacuum Science & Technol. A3(3), May/Jun 1985, H.6, pp.1703-1706.
15. Патент на полезную модель RU № 176 223 U1 «Сверхвысоковакуумный затвор». Авторы: А.Е.Вязовецкова, В.В. Вязовецков. Опубликовано: 12.01.2018 г. Бюл. № 2.