

ВЫБОР УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ ПРОГРЕВАЕМЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А.Е. Вязовецкова, В.В. Вязовецков, Л.К. Кузнецова, Ю.С.Шпанский

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены изменения упруго-пластичных деформируемых герметизируемых поверхностей в процессе термоциклирования. Для устойчивого поддержания герметичности соединения рекомендуется радиальное взаимодействие, повышение упругости системы нагружения и ограничение растекания уплотнителя из участка герметизации. Разработаны чертежи рекомендуемых соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ, КОНТАКТНЫЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ГЕРМЕТИЗАЦИЯ, ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЕ

SELECTION OF CONDITIONS FOR STABLE SEALING OF ULTRA- HIGH VACUUM HEATED DETACHABLE JOINTS

L.K. Kuznetsova, Y.S. Shpanskiy, A.E. Vyazovetskova, V.V. Vyazovetskov

ABSTRACT

The changes of elastic-plastic deformable sealed surfaces in the process of thermal cycling are considered. Radial interaction, increasing the elasticity of the loading system and limiting the spreading of the sealer from the sealing area are recommended to sustainably maintain the tightness of the joint. Drawings of recommended connections have been developed.

KEYWORDS

JOINTS, ULTRA-HIGH VACUUM, CONTACT INTERACTIONS, SEALING, MULTIPLE
THERMAL CYCLING

В сверхвысоковакуумных установках количество коммутационных устройств (фланцевые соединения, клапаны) может достигать 40 % от общего числа комплектующих изделий. На долю арматуры приходится до 57 % отказов в работе вакуумного оборудования [1].

Особенностью фланцевых соединений является способность устройств изначально достигать требуемую степень герметичности (поток натекания $\sim 1 \cdot 10^{-11}$ м³Па/с). Эксплуатация данных устройств при комнатной температуре происходит без увеличения проводимости соединений. Однако при проведении обезгаживающих прогревов вакуумных систем возможно образование повышенного натекания, ликвидируемого подтягиванием крепежа соединения или заменой уплотнителя. Такое положение приводит к большим финансовым и временным затратам при эксплуатации сверхвысоковакуумных комплексов.

С увеличением размеров прогреваемых соединений в процессе термоциклирования для большинства соединений появление натекания становится закономерным. Э.А. Тренделенбург [2, сс. 235,237] в начале шестидесятых годов прошлого века прямо высказывался о таком явлении: «Качество фланцевого соединения в общем случае определяется числом

возможных циклов нагрева. Фланцы описанного вида с золотым уплотнением выдерживают, по крайней мере, 50 циклов нагрева, если они были тщательно собраны и их диаметр не превышает 250 мм. При увеличении размеров фланцев надёжность значительно падает. Причины этого пока неясны. Можно считать, что в настоящее время ещё не существует надёжного фланцевого соединения большого диаметра».

К девяностым годам прошлого века установлена низкая надёжность фланцевых соединений с диаметром проходного отверстия 250 мм и более, выполненных согласно ГОСТ 26526-85 и работающих в условиях высокотемпературного термоциклирования. А.С. Шувалов [3, с. 5] указывает на низкую надёжность при стендовых испытаниях соединений конструкций Ду 250 КФ, которые дают течь уже при первом, втором прогреве. Там же он утверждает, что «основным недостатком является растекание уплотнителя из зоны уплотнения, обусловленное гарантированным зазором между посадочным местом во фланцах и наружным диаметром плоского уплотнителя».

Изготовление разъёмных соединений по ГОСТ 26526-85 вводилось для присоединения к зарубежному оборудованию, в котором по общему соглашению устанавливались запатентованные фирмой Varian симметричные фланцевые соединения [4].

В 2006 году О.К. Курбатов пишет [5, с. 31]: «В образцах соединения типа «conflat» Ду- 200 мм появлялись течи в среднем после 5-го термоцикла. Во всех образцах фланцевых соединений других типов появлялись течи, как правило, после нескольких циклов». На основании проведённых исследований был разработан стандарт СТП НИИВТ им. Векшинского С.А. на разъёмные соединения, охватывающий условные проходы с Ду 10 – 250 мм.

Известны призывы потребителей к необходимости разработки новых прямопролётных сверхвысоковакуумных затворов и фланцев по причине низкой надёжности таких устройств, применяемых на ускорителе при высокотемпературном термоциклировании от 25 °С до 300 °С [6].

В справочнике по вакуумной технике [7, с. 411] указано на низкую надёжность соединений Conflat с проходными сечениями более Ду 250 мм и осторожно предлагается использовать соединение Helicoflex. В заключение описания коммутационных устройств Нил Т.Пикок пишет [7, с. 412]: «Разработка металлических уплотнителей, вероятно, будет продолжаться под влиянием тенденций использования ещё более низких значений давлений для производства полупроводниковых устройств, а также в результате строительства больших ускорителей-накопителей, где большое значение имеют как крайне низкие значения давлений, так и высокая надёжность».

Обычно исследования узлов герметизации заключались в контроле усилия и течи до и после прогрева. Результатом было решение «проходит – не проходит» [8]. В одной из последних работ по изучению фланцевых соединений [9] 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 упругой С-образной оболочкой, покрытой тонким пластичным уплотнителем и установленной между полированными герметизирующими поверхностями фланцев.

Предлагалось в качестве критерия сравнения использовать величину удельного усилия герметизации [10, 11]. Данный показатель широко используется многими авторами при описании деформационных схем коммутационных устройств. Этот подход справедлив при равенстве других показателей качества и полностью игнорирует анализ формирования вакуумной плотности соединения и причин появления натекания в устройстве.

Многолетнее отсутствие реальных продвижений в разработках крупногабаритных сверхвысоковакуумных коммутационных устройств, эксплуатируемых в нестационарных термических условиях, свидетельствует о наличии проблемной ситуации. Решение таких задач требует дополнительных представлений о природе явлений, более тщательного анализа процессов, происходящих в зоне герметизации при термоциклировании соединения.

Вакуумная плотность соединения достигается силовым взаимодействием герметизирующих участков пластичного уплотнителя и герметизирующей поверхности. При снижении прикладываемого усилия герметизации упругие контактные напряжения отталкивают взаимодействующие герметизирующие поверхности, раскрывая газопроводящие каналы между разделяемыми объёмами. Понижение упругих напряжений в зоне герметизации происходит также за счёт повышенной ползучести пластического уплотнителя, вызванного высокими герметизирующими напряжениями и снижением предела текучести материала уплотнителя при прогревах. Кроме этого, при термоциклировании соединения важным является возникновение радиальных расплывающих напряжений, неизбежно возникающих при неравенстве термического изменения размеров герметизирующих элементов и уплотнителя.

Радиальное взаимодействие герметизирующих поверхностей позволяет не только понижать аксиальные усилия формирования герметизирующего контакта, но и поддерживать вакуумную плотность контакта «клинящим» воздействием при некотором снижении усилия герметизации.

В настоящее время актуальными является две задачи. Первой задачей является стыковка со стандартными фланцами Ду 250 мм и более, а вторая задача состоит в создании нового устройства для надёжного соединения крупногабаритных вакуумпроводов.

Принципиально важным отличием предлагаемых конструктивных решений выполнения деформационных схем сверхвысоковакуумных разъёмных соединений является сохранность условий вакуумной плотности при любом количестве термоциклов эксплуатации соединений.

Считаем, что для устойчивого воспроизведения процесса герметизации достаточным является обеспечение условия

$$U_{i+1} \leq U_i \leq U_{\text{доп.}},$$

где U_{i+1} - величина проводимости соединения в $i+1$ цикле срабатывания; U_i - величина проводимости соединения в i цикле срабатывания; $U_{\text{доп.}}$ - величина допустимого значения проводимости соединения.

Также считаем, что условием отсутствия текучести пластичного материала является неравенство:

$$(\sigma_{\text{max}} + \Delta\sigma_{\text{max}}) - (\sigma_{\text{min}} + \Delta\sigma_{\text{min}}) \leq \beta \sigma_s,$$

где σ_{max} , σ_{min} - первоначальное значение максимального и минимального значения напряжений в элементарной прямоугольной ячейке; $\Delta\sigma_{\text{max}}$, $\Delta\sigma_{\text{min}}$ - величины изменения напряжений; σ_s - предел текучести материала уплотнителя; β - коэффициент, зависящий от величины среднего напряжения, равный ($1 \leq \beta \leq 2 / \sqrt{3} = 1,155$).

Перемещение не произойдёт, если близлежащий участок находится под напряжением, близким по значению с наибольшим. В работе [12] рекомендуется без зазоров нагружать деформационную область уплотнителя.

Под подвижностью приповерхностного герметизирующего слоя уплотнителя $\bar{\eta}_{гер}$ мы понимаем его свойство перемещения $\bar{\varepsilon}$, зависящее от деформационной схемы D и свойств материала уплотнителя M , под воздействием прикладываемого к уплотнителю энергии \bar{E}_{np} :

$$\bar{\eta}_{гер} = \frac{\bar{\varepsilon}(D, M)}{\bar{E}_{np}}$$

Подвижность перемещения приповерхностного герметизирующего слоя уплотнителя $\bar{\eta}_{гер}$ определяется как часть всего поля смещения уплотнителя \bar{P}_{Σ} , которое зависит от всей прикладываемой к уплотнителю энергии \bar{E}_{Σ} , геометрии Γ и свойств материала уплотнителя M деформационной схемы $D(\Gamma, M)$

$$\bar{\eta}_{гер} \in \bar{P}_{\Sigma} \{ \bar{E}_{\Sigma}; D(\Gamma, M) \}$$

На этапе образования вакуумной плотности соединения используется наибольшая подвижность приповерхностного слоя уплотнителя для наиболее полного заполнения канавок шероховатостей наклонной герметизируемой поверхности. Окончание деформационного формирования соединения заканчивается созданием механических барьеров по границам участка герметизации, препятствующих растеканию уплотнителя из зоны герметизации при термоциклировании соединения.

При неизбежном микротечении уплотнителя в закрытом состоянии устройства важным является сохранение площади взаимодействия герметизирующих поверхностей соединения при достаточном напряжении взаимодействия.

Для надёжной эксплуатации устройства изменения величин деформации и проходящего потока в зоне герметизации должны выходить на плато согласно рисунку 1 [12, 13].

На рисунке 1 кривая ABCGH – направление кривой графика при герметизации соединения, кривая HGCD E – направление кривой графика при снижении прикладываемых усилий к разъёмному соединению. Q_{min} – наименьшее значение потока натекания, проходящего через соединение. I – зона активного заполнения газопроводящих каналов при герметизации; II – зона перераспределения прикладываемой к соединению энергии с поверхностной деформации на объёмную; III- зона объёмной деформации герметизирующих элементов.

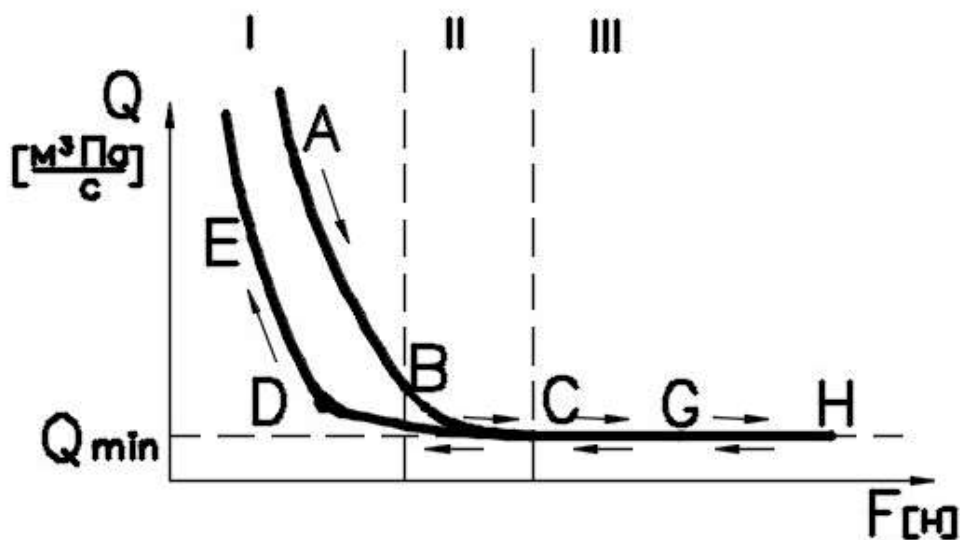


Рис. 1. График обобщённой зависимости потока натекания Q от прикладываемого аксиального усилия F в разъёмном соединении

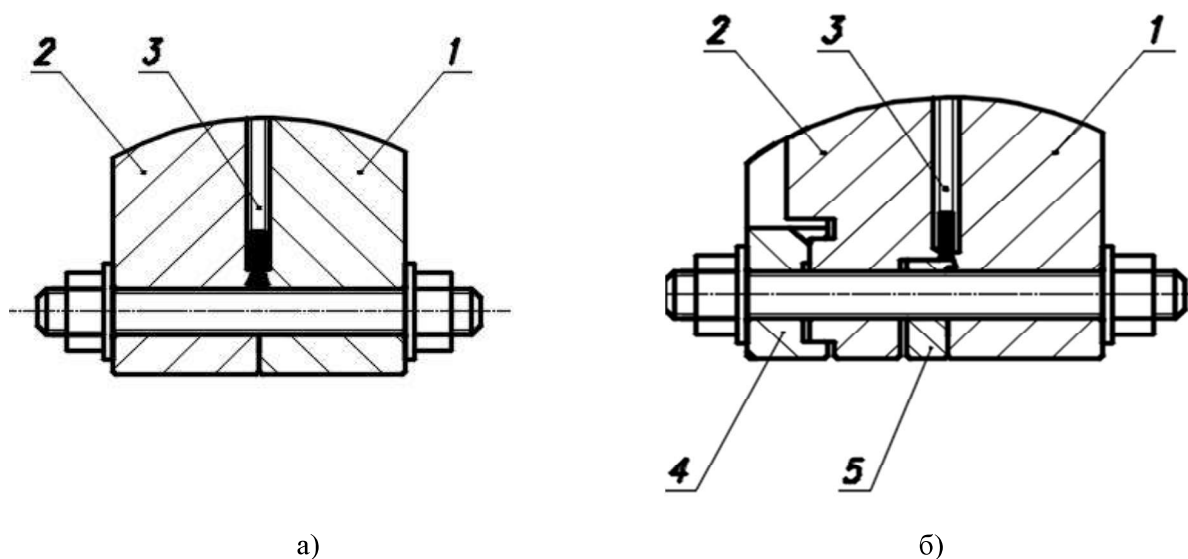
На рисунке 2б показан один из вариантов конструкции узла стыковки к стандартному фланцу 1 [12, 14]. В отличие от соединения, выполненного по ГОСТ 26526-85 и представленного на рисунке 2а, имеются следующие отличия:

- во фланец 1 вставлено жёсткое центрирующее кольцо 5, которое позволяет осуществлять совмещение фланцев соединения по более протяжённой стальной направляющей поверхности и снизить деформационное перемещение уплотнителя 3 в радиальном направлении;

- усилие герметизации передаётся посредством упругого накладного кольца 4, которое увеличивает рабочую зону упругости системы нагружения и более равномерно передаёт усилия по сравнению с системой шпилек;

- затяжка соединения осуществляется с выходом зависимости потока натекания от прикладываемого усилия герметизации на плато, при этом сохраняется герметичность соединения при некотором снижении напряжения деформирования уплотнителя (смотри положение точки G на рис.1).

Для магистральных вакуумпроводов жёсткое центрирующее кольцо 5 можно использовать для юстировки оси трассы. Применение накладного упругого фланца 4 позволяет более равномерно поддерживать продолжительные упругие контактные напряжения на участке герметизации. Возможно сделать более гибкой герметизирующую поверхность верхнего фланца, что повышает надёжность сохранения вакуумной плотности соединения при прогревах соединения.



а) – соединение, выполненное согласно ГОСТ 26526-85
б) – модифицированное присоединение к стандартному фланцу
1, 2 – фланцы, 3 – уплотнение, 4 – накидной упругий фланец, 5 – жёсткий направляющий фланец

Рис.2. Модификация присоединения к стандартному фланцу [13, 14]

В СССР повсеместно применялись канавочно-клиновые соединения, охватывающие соединения с Ду 10 мм по Ду 750 мм [15, с. 267-271]. Эти соединения по сравнению с остальными в наибольшей мере обладают признаками, позволяющими получать высокие показатели герметичности. К общеизвестным недостаткам этих соединений относят жесткие допуски на размеры посадочных мест и уплотняющего профиля, сложность контроля геометрии профиля, наличие в пространстве между выступом и дном канавки замкнутого объёма, который при определённых условиях может стать источником газовыделения, большие габариты и масса фланцев, а также их несимметричность.

На рисунке 3 показан путь эволюции деформационной схемы канавочно-клиновой системы. На рисунке 3а условно показано соединение с серебряной фольгой, размещённой между шипом и пазом [16, с. 270]. Причём угол наклона паза больше угла наклона шипа с уплотнителем. Схема выполнения деформационной схемы с равными углами наклона герметизирующего выступа и канавки, представленная на рисунке 3б, изучалась в работах [17, 18]. Отсутствие пластической деформации уплотнителя не позволяет получить достаточную проводимость, предлагалось использовать для более низкой проводимости контакта охранный вакуум [18]. Этот недостаток был устранён внедрением запечиков, размещённых у подножия герметизирующего выступа, и по сравнению с углом герметизирующего выступа, равным 90° , снижением угла наклона канавки α до 80° [19, с.63], а затем до 60° [15, с.267]. Последнее соединение широко применялось, несмотря на определённые сложности выполнения.

В обзорной статье [20] предлагается схема с одним деформационным участком, представленная на рисунке 3г. Большая протяжённость герметизирующего участка с их малым углом наклона и строение фланцев сделало устройство чувствительным к точности выполнения соединения. Для больших перекрываемых отверстий важным является обеспечение равномерного нагрева обоих фланцев соединения.

Предлагаемая деформационная схема на большие проходные сечения (Ди 250 мм и более) представлены на рисунках 3д и 3е. С целью повышения напряжения текучести пластичного уплотнителя при термоциклировании часть канавки выполнена с углом наклона герметизирующей поверхности, близким к углу наклона герметизирующей поверхности выступа β .

Авторы модернизировали конструкцию канавочно-клинового соединения, используя вместо двух один участок герметизации с торможением растекания уплотнителя по обеим его границам [21]. На рисунке 4 показан вариант выполнения деформационной схемы зоны герметизации модернизированного канавочно-клинового соединения. Главной идеей данной схемы является создание малого 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 конструктивных сочетаниях по границам узкого наклонного участка герметизации с высоким напряжением сжатия. Такое решение способствует созданию более высокой концентрации напряжений на участке герметизации посредством более эффективного торможения растекания уплотнителя. Появилась возможность увеличить наклон герметизирующих поверхностей, повышая упругую радиальную составляющую усилия герметизации. В некоторых случаях становится возможным сохранить герметичность соединения с уменьшением прикладываемого усилия герметизации, позволяя этим снизить габариты и массу всего соединения. Важным является ликвидация замкнутой полости на дне канавки стандартного соединения.

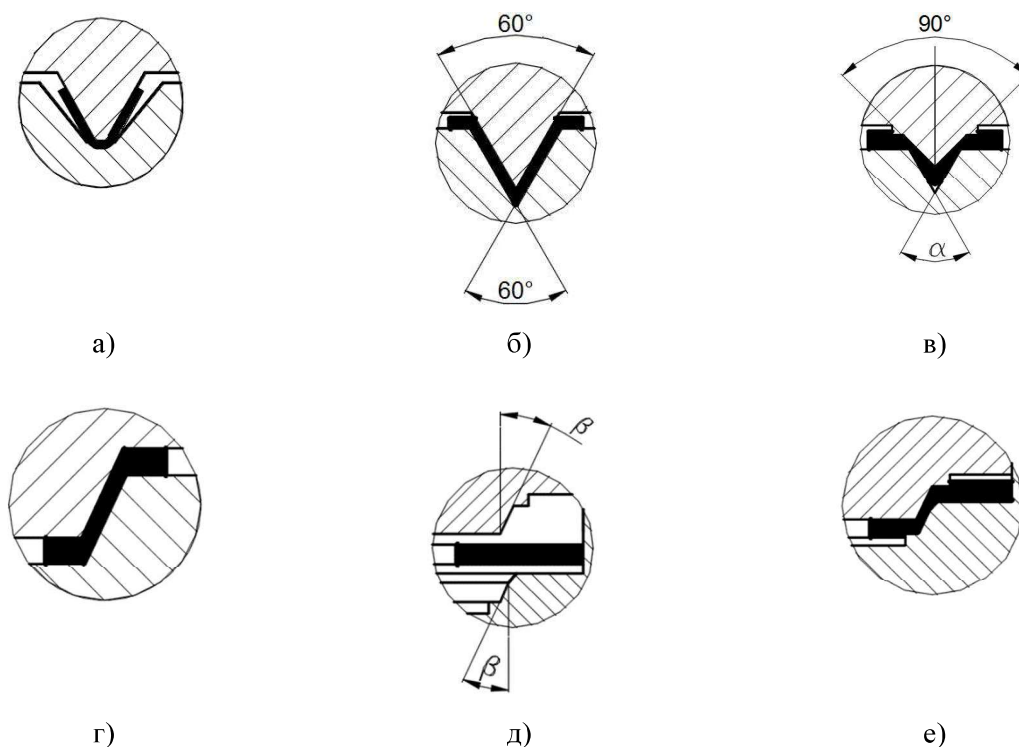
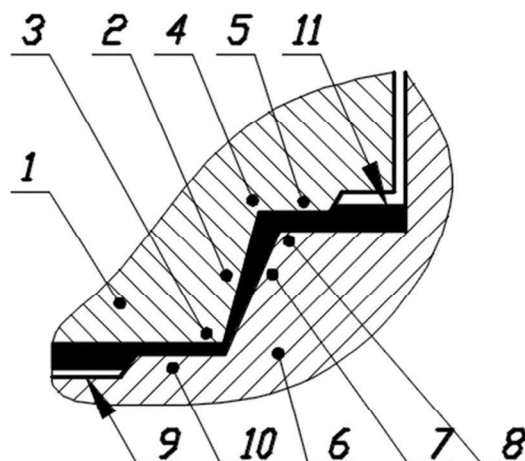


Рис. 3. Эволюция деформационной схемы канавочно-клинового соединения



1 – Верхний фланец с клиновым герметизирующим выступом, 2 – Клиновая наклонная герметизирующая поверхность выступа, 3 – Герметизирующий выступ, 4 – Основание наклонной герметизирующей клиновой поверхности, 5 – Верхний деформационный выступ, 6 – Нижний фланец с герметизирующей канавкой, 7 – Наклонная герметизирующая поверхность канавки, 8 – Основание канавки, 9 – Дно канавки, 10 – Нижний деформационный выступ, 11 - Уплотнитель
Рис.4. Деформационная схема зоны герметизации канавочно-клинового соединения:

По предлагаемому решению, представленному на рисунке 4, изготовили фланцы Ду 10 - 250 мм и фланцевое соединение Ду 250 мм, выполненное согласно рисунку 2б. Была проведена проверка этих соединений на герметичность при комнатной температуре. Величина натекания находилась за пределами чувствительности средств измерения. Поиск течи в процессе термоциклирования не проводился.

ВЫВОДЫ

Проведённая работа, позволила сделать следующие выводы:

В настоящее время отсутствуют надёжные разъёмные сверхвысоковакуумные коммутационные устройства на большие проходные сечения, многократно прогреваемые до 300 – 450 °С.

Установлены явления, приводящие к разгерметизации прогреваемых разъёмных соединений, и условия, требуемые для повышения количества рабочих термоциклов.

Приведены примеры выполнения разъёмных соединений, в которых существенно повышается упругость системы нагружения соединения, ограничивается растекание материала уплотнителя из локального участка герметизации и сохраняется площадь деформации уплотнителя.

Изготовленные макетные образцы разъёмных соединений успешно прошли испытания на герметичность при комнатной температуре.

На протяжении многих лет отсутствует финансирование работ на проведение оценки надёжности герметичности разъёмных сверхвысоковакуумных коммутационных соединений в процессе их термоциклирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние и перспективы разработок вакуумной арматуры. О.К. Курбатов, К.Д. Данилов, Л.А. Филатовский. Отраслевая научно-техническая конференция «Состояние и

- перспективы развития вакуумной арматуры». Тезисы докладов. 29-30 мая 1979г. Москва.
2. Э. Тренделенбург «Сверхвысокий вакуум», перевод с немецкого под редакцией М.И. Меньшикова, - М. «Мир», 1966 г.
 3. А.С.Шувалов «Соединительные элементы сверхвысоковакуумных систем». Вакуумная техника и технология, 1994, т.4, № 4, с.2-25.
 4. United States Patent Office № 3,208, 758 , Cl. 277-171, Metal vacuum joint, patented Sept, 28, 1965, Maurice A. Carlson and William R. Wheeler
 5. О.К. Курбатов «Физико-технические основы создания оптимизированных высоковакуумных магниторазрядных насосов, герметизирующих элементов и устройств для вакуумного технологического и аналитического оборудования электронной техники». Автореферат диссертации на соискании учёной степени доктора технических наук. Москва. 2006 г.
 6. C.L. Foerster and D.Mc Cafferty “Selection and evaluation of ultrahigh vacuum gate valve for ISABELLE beam line vacuum system”. J. Vac. Sci. Technol. April 1981, p.997-1000.
 7. «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.
 8. A. Rot «Sealing mechanisms in bakeable vacuum seals». Journal of Vacuum Science & Technol. A1 (2), 1983, Apr-June, pp.211-219.
 9. 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 № 3, 134-138.
 10. А.А. Глазков, И.Ф. Малышев, Г.Л. Саксаганский «Вакуумные системы электрофизических установок».- М.: «Атомиздат», 1975 г.
 11. Л.Н. Розанов «Вакуумная техника». 2 изд. М. «Высшая школа», 1990г. –320с.
 12. В.В. Вязовецков, Л.К. Кузнецова, Ю.С. Шпанский «Сверхвысоковакуумное прогретаемое соединение», патент на полезную модель №208698, приоритет с 29 июня 2021 г.
 13. А.Е. Вязовецкова, В.В. Вязовецков «Пути совершенствования сверхвысоковакуумных коммутационных устройств», Вакуумная техника и технология, т.25, № 2, 2015, с.104-105.
 14. 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.
 15. А. В. Балицкий «Технология изготовления вакуумной аппаратуры», М. «Энергия», Изд.3, 1974 г.
 16. Р. Яккель «Получение и измерение вакуума». Перевод с немецкого Е.Н. Мартинсона, под редакцией М.И. Меньшикова, Издательство иностранной литературы. 1952 г.
 17. Von Heinrich Hintenberger «Erfahrungen mit Metallfolien als Hochvakuumdichtungen», Zeitschrift fur naturforschung, Band 6a, Juli 1951, Heft 7, p. 459 – 463.
 18. Д.Б. Зворыкин «Вопросы расчёта и конструирования цельнометаллических высоковакуумных систем и их элементов». Диссертация на соискание учёной степени к. т. н. М., 1955 г.
 19. В.А. Ланис, Л.Б. Левина «Техника вакуумных испытаний», под редакцией М.И. Меньшикова, Государственное энергетическое издательство, М.-Л. 1963 г.

20. R. Brymner and W. Steckelmacher “Demountable vacuum seal for operation at temperatures from – 180°C to 800 °C”, Journal of scientific instruments, vol.36, June 1959, p. 278 – 281.
21. 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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лариса Константиновна Кузнецова – Учёный секретарь Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий (ККТЭиПТ), НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Юрий Сергеевич Шпанский – Начальник отдела термоядерных реакторов, Отделение Токамаков, ККТЭиПТ, НИЦ «Курчатовский институт»; Национальный исследовательский университет МЭИ, г. Москва.

Анна Евгеньевна Вязовецкова – ведущий инженер лаборатории научного приборостроения, Курчатовского центра синхротронного излучения, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. В настоящее время на пенсии.

Владимир Владимирович Вязовецков – старший научный сотрудник отдела термоядерных реакторов, Отделение Токамаков, ККТЭиПТ, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.