

## ВАКУУМНО-ПЛОТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО ВАКУУМА В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ УСКОРИТЕЛЕЙ С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМИ КАМЕРАМИ

© 2019 г. В. В. Анашин<sup>a</sup>, А. А. Краснов<sup>a,b</sup>, А. М. Семенов<sup>a,c,\*</sup>, С. Р. Шарфеева<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11

<sup>b</sup> Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>c</sup> Новосибирский государственный технический университет  
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

\*e-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 20.08.2018 г.

После доработки 20.08.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

В создаваемых ускорительных комплексах с большой апертурой вакуумных камер, таких как FAIR (Дармштадт, Германия) и NICA (Дубна, Россия), требуется обеспечение высокого или сверхвысокого вакуума. Одной из проблем при проектировании таких систем является выбор вакуумно-плотных соединений и типа уплотнений. Рассматривается применение фланца типа ISO-K с упругим металлическим уплотнением как наиболее перспективное решение в качестве возможного варианта разъемного вакуумного соединения по сравнению с использованием фланцев COF, ConFlat или плоских фланцев VATSeal.

DOI: 10.1134/S0032816219030017

Уже не первый год создаются ускорительные комплексы для фундаментальных исследований, такие как FAIR (Германия) и NICA (Россия), в которых планируется ускорять протоны/антипротоны или тяжелые ионы. В таких комплексах необходимо обеспечить высокий ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  мбар, например в Collector Ring, FAIR, Германия) или сверхвысокий вакуум ( $10^{-10}$ – $10^{-12}$  мбар, например в Нуклотроне, NICA, Россия). Одной из особенностей данных ускорителей является большая апертура вакуумных камер (400 мм и более). Разработка вакуумных систем включает в себя не только выбор средств откачки, материала и апертуры вакуумных камер и прочего, но и вакуумно-плотных соединений и уплотнений. В настоящее время в мире есть множество различных типов вакуумных соединений и уплотнений, позволяющих получить высокий и сверхвысокий вакуум. Но каждый тип имеет свои достоинства и недостатки, к которым можно отнести стоимость фланцев или уплотнения, опыт применения того или иного типа соединения на различных установках, а также толщину фланцев и необходимое для их стыковки место. Чем тоньше фланец и чем меньше требуется пространства на стыковку, тем больше будет полезного пространства для установки магнитов,

элементов диагностики или другого дополнительного оборудования.

Одним из возможных решений являются сварные фланцы, которые завариваются “вручную”, но данный тип соединения ограничен количеством циклов “сварка/резка” (единицы раз) без уменьшения линейного размера камеры, в то время как разъемные соединения можно использовать десятки и даже сотни раз при установке каждый раз нового уплотнения. К тому же при каждой резке происходит уменьшение длины камеры, для компенсации которой необходимо применение дополнительных сильфонов, что в свою очередь приведет к удорожанию вакуумной системы.

В данной статье рассмотрены преимущества и недостатки различных разъемных вакуумно-плотных соединений и их уплотнений, которые широко используются в ускорительной технике по всему миру. Предлагается использовать фланцевые соединения типа ISO-K с упругими C-образными уплотнениями как наиболее перспективные соединения.

В настоящее время в ускорительной технике по всему миру широко используются фланцевые соединения типа ConFlat с плоским медным уплотнением. Но соединения данного типа огра-

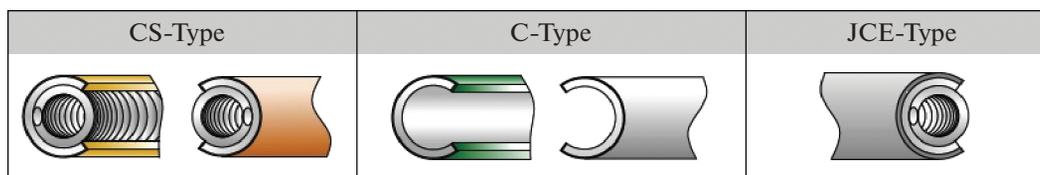


Рис. 1. Примеры тестируемых С-образных уплотнений [3].

ничиваются коммерческой продукцией с максимальным размером DN300–DN350 [1]. При этом с увеличением проходного диаметра увеличивается и толщина фланца, что требует большего рабочего пространства для стыковки. В ИЯФ СО РАН был создан прототип вакуумной камеры для резонатора NICA с фланцами DN500 типа ConFlat. Толщина таких фланцев была равна 35 мм. Данная камера была собрана, откачена и один раз испытана. Чтобы стандартизировать данный размер фланца, необходимо провести десятки (даже сотни) вакуумных испытаний. Кроме того, нужно помнить, что даже незначительное отклонение (0.2–0.3 мм) фланца (после сварки) от перпендикулярной плоскости к вакуумной камере может привести к невозможности создания вакуумно-плотного соединения.

Фланцевое соединение типа COF с медным уплотнением из металлической проволоки также широко используется в вакуумной технике в системах с большой апертурой камер (до 2 м). Но фланцы данного типа имеют большую толщину и требуют большего усилия для вакуумно-плотного соединения по сравнению с фланцами ConFlat.

В последнее время получили распространение плоские фланцевые соединения на основе уплотнений специальной формы, например, в вакуумных камерах, в которых происходит сжатие пучка в XFEL (Гамбург, Германия). Преимуществами данного типа соединений являются простота подготовки поверхности фланца, а также создание практически любого профиля уплотнения. Но данные преимущества в то же время являются и недостатками таких фланцев: изготовление уплотнения нестандартной формы оказывается весьма дорогостоящим. Также предъявляются жесткие требования к шероховатости поверхности фланца (не должно быть царапин, пор, сколов). Одной из фирм, занимающейся изготовлением данных уплотнений, является фирма VAT, производящая медные уплотнения (VATSeal) для плоских фланцев [2].

И, наконец, фланцы типа ISO-K применяются с резиновыми или витоновыми уплотнениями на центрирующих кольцах (стандарт). Хотя такие фланцы и применяются в вакуумных камерах с проходным размером Ду до 4 м, они обладают неоспоримым преимуществом, таким как малая толщина фланцев, и, следовательно, малым необходимым расстоянием для стыковки по сравне-

нию с фланцами вышеперечисленных типов. Однако с такими уплотнениями невозможно получить сверхвысокий вакуум. Для получения сверхвысокого вакуума в данной работе предлагается использовать упругие С-образные уплотнения с нанесенным мягким гальваническим покрытием (рис. 1), при этом сами фланцы остаются неизменными. Принцип герметизации таких уплотнений основан на пластической деформации С-кольца, у которого пластичность больше, чем у материала фланца. Уплотнение происходит между уплотняющей поверхностью фланца и упругим С-кольцом. Во время сжатия результирующее удельное давление заставляет С-кольцо сжиматься и заполнять дефекты фланца, обеспечивая при этом положительный контакт с уплотнительными поверхностями фланца. Деформируются верхняя и нижняя кромки уплотнения, при этом зазор между фланцами не должен быть меньше 5.18–5.28 мм. Для этого на одном из фланцев устанавливаются ограничители. Кроме того, уплотнения с мягким гальваническим покрытием обладают очень важным свойством выдерживать небольшие деформации после сборки фланца, связанные с изменениями температуры или давления за счет упругости уплотнения [3]. Данное свойство является достаточно полезным, так как хорошо известно, что любое здание подвержено сезонным “просадкам/подъемам” фундамента, что влечет за собой и “просадку/подъем” фрагментов установки, вследствие чего возможен излом вакуумного соединения с последующим нарушением герметичности. Поскольку именно фланцы ISO-K с С-образными уплотнениями представляются лучшим решением в выборе вакуумно-плотного соединения, то был проведен ряд экспериментов для изучения поведения таких соединений при различных нагрузках.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики соединений различных типов для размера фланцев DN500.

Для проведения испытаний был создан вакуумный стенд, схема которого представлена на рис. 2. Стенд включает в себя вакуумную часть, испытываемый образец (фланцевое соединение) и грузоподъемный механизм.

Вакуумная система обеспечивает вакуум  $10^{-6}$  мбар и лучше. Откачка осуществляется с помощью турбомолекулярного (ТМР) и безмасляного фор-

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики соединений различных типов для фланцев размера DN500

Тип	Толщина фланца, мм	Необходимое расстояние, мм	Тип уплотнения	Максимальный проходной диаметр, мм	Установки
ConFlat	35	120	Кольцевое Cu-уплотнение	≤DN400	ИЯФ СО РАН (DN500)
COF	43	155	Cu-проволока	≤DN2000	ИЯФ СО РАН (до DN1000)
Flat	25	95	VATSeal	>500 × 100 прямоугольные	РЕТРА III, XFEL
ISO-K	17	80	Упругие С-образные уплотнения с мягким гальваническим покрытием	<DN4000	НТМС, ИЯФ СО РАН

вакуумного (*MP*) насосов и углового клапана *VR*<sub>3</sub>. Измерение давления проводится с помощью широкодиапазонного датчика давления *FRG* (датчик давления с холодным катодом + форвакуумный датчик давления Pirani). Контроль за герметичностью во время испытаний выполняется течеискателем *LD* (предел чувствительности натекания по гелию <math>5 \cdot 10^{-12}</math> л · Торр/с). Угловые клапаны *VR*<sub>1</sub> и *VR*<sub>2</sub> необходимы для предотвращения напуска атмосферы во время остановки вакуумного оборудования.

Испытываемый образец (фланцевое соединение) состоит из фланца-заглушки ISO-K DN500, через который осуществляется откачка соединения; подставки, на которой жестко закрепляется фланец-заглушка; ответного фланца ISO-K DN500 с “плечом”, к которому прикладывается усилие, равное 10 кН · м, и силовой тяги грузоподъемного механизма, способного обеспечить данное усилие.

До проведения испытаний осуществляется вакуумно-плотная сборка фланцев. Для того, чтобы не допустить чрезмерной деформации уплотнения, на одном из фланцев устанавливаются на одинаковом расстоянии друг от друга ограничители. Вакуумно-плотное соединение обеспечивается двойными зажимами, причем для разных типов уплотнений применяется разное количество данных зажимов. Перед установкой зажимы обрабатываются, например, дисульфидом молибдена для уменьшения силы трения.

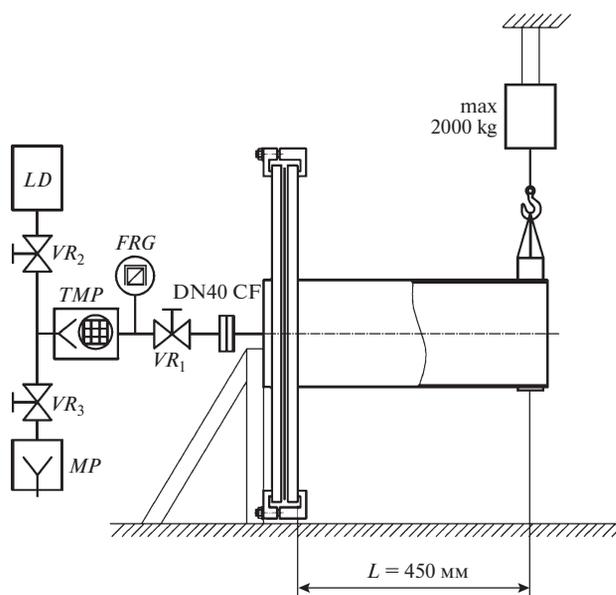
После создания вакуумно-плотного соединения проводится проверка на герметичность в течение 2–3 мин при помощи чехла из полиэтилена, наполненного газообразным гелием. Данный метод позволяет более качественно осуществлять проверку на герметичность по сравнению с обдувкой снаружи потоком гелия.

Далее проверка на герметичность осуществляется под прикладываемой нагрузкой через каждые 1.5 кН · м до максимальной величины, равной 10 кН · м. Затем нагрузка плавно уменьшается до

нуля и выполняется окончательная проверка на герметичность.

Одно из покрытых серебром и с “мягкой” пружиной уплотнений дополнительно подвергается только прогреву при температуре, равной 350°C, в течение 4 ч. После охлаждения до комнатной температуры выполняется окончательная проверка на герметичность при помощи чехла из полиэтилена, наполненного газообразным гелием.

Были протестированы уплотнения четырех разных типов (с “мягкой” или “жесткой” пружиной или без нее, с разными покрытиями и способом обработки уплотнений), произведенные фирмой



**Рис. 2.** Упрощенная схема вакуумного стенда. *TMP* – турбомолекулярный насос, *MP* – безмасляный форвакуумный насос, *VR*<sub>1</sub>–*VR*<sub>3</sub> – угловые клапаны, *FRG* – широкодиапазонный датчик давления (датчик давления с холодным катодом + форвакуумный датчик давления Pirani), *LD* – течеискатель (предел чувствительности натекания по гелию <math>5 \cdot 10^{-12}</math> л · Торр/с).

**Таблица 2.** Основные параметры С-образных уплотнений

Тип	CE-052800-6.35H-2/0-4-SN50	CSE-052800-6.35H-2/2-1-S50	JCE-052800-6.20M-2/2-1-A300	CSE-052800-6.35M-2/2-1-S50
Диаметр уплотнения, мм	528	528	528	528
Поперечный размер уплотнения, мм	6.35	6.35	6.2	6.35
Толщина стенки уплотнения, мм	0.64	0.64	0.51	0.64
Материал C-ring	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718
Материал пружины	—	Alloy 718	Alloy 718	Alloy 718
Покрытие	Олово	Серебро	Алюминиевый сплав	Серебро
Толщина покрытия, мкм	30–50	30–50	300	30–50
Нагрузка, Н/мм	160	770	230	325
Обработка	Отжиг + осаждение	Деформационное упрочнение	Деформационное упрочнение	Деформационное упрочнение
Поперечный размер всех уплотнений после сжатия 5.18–5.28 мм				

**Таблица 3.** Результаты испытаний уплотнений

Тип	CE-052800-6.35H-2/0-4-SN50	CSE-052800-6.35H-2/2-1-S50	CSE-052800-6.35M-2/2-1-S50	JCE-052800-6.20M-2/2-1-A300
Кол-во зажимов	24	48	48	До 48
Усилие, Н · м	35 <sup>1)</sup>	45 <sup>1)</sup>	45 <sup>1)</sup>	>45
Максимальная нагрузка, кН · м	10 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>
Кол-во циклов затягиваний	2–5 <sup>3)</sup>	1–2 <sup>4)</sup>	Только 1	0
Кол-во тестируемых уплотнений	3	2	2 <sup>5)</sup>	2
Натекание, л · мбар/с	<10 <sup>-10</sup>	<10 <sup>-10</sup>	<10 <sup>-10</sup>	>10 <sup>-9</sup>
Кол-во неудавшихся уплотнений	0	0	1 <sup>6)</sup>	2

*Примечание:* <sup>1)</sup> максимальное усилие дается таким, чтобы зазор между фланцем и ограничителями на ответном фланце был <0.05 мм, хотя герметичность достигалась при меньших усилиях; <sup>2)</sup> нарушение герметизации для фланца DN250 CF появляется при нагрузке, равной 8 кН · м; <sup>3)</sup> если зазор между ограничителями и фланцем <0.05 мм, то количество циклов затягиваний равно 2, иначе возможно до 5 раз; <sup>4)</sup> если зазор между ограничителями и фланцем <0.05 мм, то количество циклов затягиваний равно 1, иначе возможно до 2 раз; <sup>5)</sup> одно уплотнение только на прогрев, другое – под нагрузкой; <sup>6)</sup> герметизация не достигается при количестве двойных зажимов (36 шт).

High Tech Metal Seal (HTMS, Мехелен, Бельгия) [3]. В табл. 2 представлены основные параметры уплотнений.

В табл. 3 представлены результаты испытаний для каждого типа уплотнения. Каждое испытание проводится при достижении уровня фона (при открытом клапане на тестируемый объект) в пределах от 10<sup>-10</sup> до 4 · 10<sup>-10</sup> л · Торр/с. При этом уровень флуктуаций измерений во время испытаний не превышает (1–2) · 10<sup>-11</sup> л · Торр/с.

Как видно, уплотнение типа JCE не обеспечивает необходимую вакуумную герметичность соединения, хотя к нему прикладывается усилие, большее 45 Н · м (до 60 Н · м), и используется большее количество зажимов [4]. Для уплотнений остальных типов не зарегистрировано натекания

выше 10<sup>-10</sup> л · Торр/с при количествах зажимов: для CE – не менее 24 шт, для CSE – не менее 48 шт.

Под необходимым усилием понимается максимальное усилие, при котором зазор между фланцем и ограничителями на ответном фланце был равен или меньше 0.05 мм, хотя герметичность достигается и при меньших усилиях. При этом одно и то же уплотнение возможно применять несколько раз; при меньших усилиях возможно увеличение количества циклов (сборка/разборка фланцев). Это свойство особенно актуально для уплотнения типа CE, которое обеспечивает герметичность и выдерживает нагрузки при усиллии 20 Н · м (при каждом последующем использовании необходимо увеличивать усилие при затягивании). Тем самым достигается

использование одного и того же уплотнения не менее пяти раз.

Так как уплотнение типа CSE изготовлено из Alloy 718 и покрыто серебром, допускающим прогрев до 450°C, то представляется интересным поведение такого уплотнения во время прогрева и после него. Но поскольку прогрев осуществляется в течение одного-двух дней и обычно за это время существенных подвижек фундамента не происходит, то нет смысла испытывать данное уплотнение при нагрузке.

Все виды С-образных уплотнений при комнатной температуре хорошо себя ведут при поперечной нагрузке до 10 кН · м, кроме уплотнений типа JCE. Нарушение же герметичности для фланцевого соединения DN250 типа ConFlat наблюдается уже при нагрузке 8 кН · м.

Полученные результаты подтверждают, что фланцы ISO-K с металлическими С-образными уплотнениями могут быть успешно применены в широкоапертурных вакуумных системах. На основании полученных результатов принято решение о создании некоторых дипольных вакуумных камер с фланцами типа ISO-K в Collector Ring (FAIR, Германия) [5] и резонатора для NICA (Россия). Например, резонатор для NICA (Ø500 и длиной 1000 мм) изготавливается из нержавеющей стали 316 L. Коэффициент термического газовыделения нержавеющей стали, прогретой при 300°C в течение 24 ч, равняется  $10^{-12}$  л · Торр/с/см<sup>2</sup>. Суммарный поток десорбированного газа равен  $1.5 \cdot 10^{-8}$  л · Торр/с. Тогда при использовании комбинированных насосов (картридж с нераспыляемым геттером и магнитоэридный насос), например NEXToгг с быстротой откачки 1000 л/с по водороду, можно получить уровень вакуума  $1.5 \cdot 10^{-11}$  Торр.

Как видно из результатов эксперимента, достоинствами С-образных уплотнений с покрытием из олова являются значительное количество применений каждого уплотнения (до 5 раз), меньшее количество используемых двойных зажимов и меньшее максимальное усилие, необходимое для герметизации стыка. Недостатком является ограниченная температура прогрева, которая не должна превышать 200°C. Применение уплотнений типа CSE, покрытых серебром, возможно в прогреваемых вакуумных системах (максимальная температура прогрева 430°C), но данное уплотнение может использоваться только один раз, независимо от того, осуществляется прогрев или нет.

Хорошей альтернативой уплотнениям типа CSE являются уплотнения типа SE с покрытиями, способными выдерживать нагрев до 450°C, например серебром.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог фирмы MDC. <https://www.mdcvacuum.com/DisplayContentPage.aspx?cc=5ff5ef3e-e001-4750-aa47-820a8d52df82>
2. Каталог фирмы VAT. [http://www.vatvalve.com/en/business/valves/catalog/H/350\\_1\\_A](http://www.vatvalve.com/en/business/valves/catalog/H/350_1_A)
3. Каталог фирмы HTMS. <http://www.hightechmetal-seals.com/catalogue/htms-full-catalogue-english.pdf>
4. Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. Препринт ИЯФ 2017-14. Новосибирск, 2017.
5. Детальная спецификация на дипольную камеру Detailed Specifications F-DS-VU-E\_CR-Dipoles\_Vacuum Chamber\_v2.17. <https://edms.cern.ch/document/1518019/2.17>