

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Давтяна Альберта Арутюновича по теме «**Разработка технологии фланцевых соединений типа ConFlat в системах сверхвысокого вакуума**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности А.04.20 – «Физика пучков и ускорительная техника»

Актуальность. Системы сверхвысокого вакуума (СВВ) являются одной из важнейших инфраструктур современных науки и техники и широко применяются в ускорителях частиц, материаловедении, микроэлектронике и других передовых областях. Надежная работа таких систем в значительной степени определяется качеством герметичных соединений, среди которых особое место занимают так называемые фланцевые соединения типа ConFlat (CF). Они основаны на принципе герметизации, при котором деформирующая кромка фланца из нержавеющей стали вдавливается в мягкое медное или алюминиевое уплотнительное кольцо, обеспечивая герметичность СВВ.

Несмотря на широкое применение CF-фланцев, вопросы их многократного использования, а также полного анализа их напряженно-деформированного состояния в зависимости от механических усилий и тепловых изменений до настоящего времени изучены недостаточно. При этом, для обеспечения качества герметизации СВВ, важен учет не только деформаций уплотнительного кольца, но и деформаций самих фланцев.

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию напряженно-деформированного состояния фланцевых соединений типа CF, выявлению механизмов их герметизации, а также разработке новых инженерных решений, направленных на повышение и сохранение герметичности системы – актуальной задачи в функционировании современных СВВ.

Содержание диссертации. Она состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость. Намечены задачи для повышения герметичности CF-фланцевых соединений и их надежности.

В первой главе представлен аналитический обзор фланцевых соединений типа CF, используемых в ускорителях и в СВВ. Рассмотрены как стандартные, так и нестандартные

конструкции фланцев, их структурные особенности, типы уплотнительных колец, свойства используемых материалов, а также применяемые методы герметизации.

В главе сформулирована задача исследования пластической деформации во фланцах с точки зрения ограничения их многократного использования, что составляет одну из ключевых научных мотиваций данной работы. В целом же глава формирует необходимую теоретическую, методологическую и экспериментальную основу для последующих исследований.

Во второй главе описана технологическая и метрологическая инфраструктура, использованная в работе, которая обеспечивает необходимую точность при изготовлении экспериментальных образцов и их последующем исследовании.

В главе представлены примененные современные станки и контрольно-измерительное оборудование. Приведены их технические характеристики и выполнен анализ их возможностей для способности обеспечить техническую и технологическую основу как для изготовления опытных фланцевых образцов, так и их последующих экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены логически выстроенные комплексные численные и экспериментальные исследования для многопланового исследования механического поведения фланцевых соединений типа CF-фланцев - моделей CERN-а и Уилера.

При моделировании учтены не только упругие, но и пластические свойства материалов, что существенно повышает достоверность полученных результатов. Сетка конечных элементов моделирования выбрана достаточно плотной, что позволило получить детализированную картину распределения напряжений и деформаций в контактных зонах.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что различные стандартные модели демонстрируют существенно различное механическое поведение. Обнаружено, что фланцы модели CERN в основном подвергаются локальному смятию, обеспечивая относительно стабильное положение деформирующей кромки, тогда как в модели Уилера наблюдается также пластический изгиб.

Из представленных зон распределения пластических деформаций деформирующей кромки фланцев разработаны конкретные технические рекомендации по оптимальному выбору геометрических параметров. В частности, предлагается применять модель CERN-а

в определённом диапазоне радиусов скругления и использовать отождённые уплотнительные кольца для обеспечения минимальных остаточных деформаций фланцев.

В отдельном подразделе выполнен расчёт болтового соединения. Усилия, необходимые для затяжки фланцев, получены на основе данных моделирования, а расчёты выполнены классическим методом с использованием предела текучести материала в качестве допустимого напряжения. Такой подход обоснован как более строгий инженерный критерий, позволяющий исключить пластическую деформацию болтов. Выработаны технические рекомендации для обеих стандартных моделей с учётом материала болтов, классов прочности, их количества и диаметра.

Для утверждения численных результатов проведены экспериментальные исследования с количеством циклов герметизации до четырёх. Металлографическое исследование сечений образцов позволило оценить изменения зон герметизации и сопоставить их с результатами моделирования. Сравнение экспериментальных и численных данных показало удовлетворительное количественное и качественное соответствие, что подтверждает применимость выбранных методов моделирования. Одновременно установлено, что в процессе многократных циклов герметизации происходит пластическая деградация фланцев, выражающаяся в постепенном изменении их основных характеристик.

Глава заканчивается важным результатом - получением эмпирических аппроксимированных функций, позволяющих оценивать изменение высоты деформирующей кромки в зависимости от числа циклов герметизации без применения сложных моделирований.

Четвёртая глава посвящена исследованию процесса герметизации фланцевых соединений типа CF в условиях высоких температурных градиентов, что особенно важно с точки зрения реальной эксплуатации систем СВВ, работающих в высокотемпературных условиях. В главе представлены результаты как численного моделирования, так и экспериментальных исследований. Показано, что повышение температуры от комнатной до 300 °C приводит к существенным изменениям напряжённого состояния. Обнаружено, что максимальные значения напряжений Мизеса для различных уплотнительных колец различаются значительно. Установлено, что наблюдаемое явление определяется несколькими взаимосвязанными факторами: возникновением термических напряжений, увеличением степени вдавливания деформирующей кромки вследствие теплового

расширения материалов, а также частичной релаксацией напряжений при высоких температурах. Указанные механизмы в целом согласуются с общепринятыми представлениями материаловедения. Получены зоны распределения остаточных деформаций на различных температурных этапах – при нагреве и последующем охлаждении, что позволяет оценивать влияние термических циклов на механическую стабильность узла.

Одним из важных результатов главы является вывод о том, что при высокотемпературных градиентах использование отожжённых уплотнительных колец является менее предпочтительным по сравнению с упрочнёнными. Это обосновано тем, что в случае упрочнённых колец при повышении температуры происходит частичный отжиг и размягчение материала, что приводит к снижению пластической деформации деформирующей кромки.

Для утверждения численных результатов проведены экспериментальные исследования при температурах до 300 °С и многократных циклах герметизации. Используемая экспериментальная методология, включая системы нагрева и контроля температуры, в целом соответствует общепринятым подходам для подобных исследований. Полученные результаты подтверждают основные тенденции моделирования и позволяют сформулировать практические рекомендации. Однако отсутствие эмпирических зависимостей для упрочнённых уплотнительных колец указывает на необходимость дополнительных исследований в данном направлении.

Пятая глава посвящена разработке новых геометрических решений фланцевых соединений типа CF и оценке их эффективности, что является наиболее важной составляющей прикладной направленности работы.

В главе выполнено большое количество численных моделирований с изменением параметров стандартной геометрии с целью выявления наиболее оптимальных решений. В качестве основного критерия оценки выбрана максимальная пластическая деформация деформирующей кромки. В соответствии с численным анализом разработаны новые геометрии деформирующей кромки. Была предложена волнообразная геометрия. Однако в дальнейшем она была отклонена и обоснованием этого послужило образование замкнутых объёмов, что может негативно повлиять на обеспечение герметизации СВВ.

Наиболее интересным и содержащим научную новизну результатом является разработка СНЕ-модели, основанная на идее применения геометрии режущих инструментов (в частности, сверла). Предложенное промежуточное соединение направлено на более равномерное распределение напряжений и стабилизацию процесса герметизации. В результате моделирования выявлено, что в вершинах промежуточного элемента наблюдается неравномерное напряжённое состояние, что было учтено при последующей геометрической оптимизации.

В результате разработаны две новые CANDLE-модели – оптимизированная геометрия CF и СНЕ-модель, для которых выполнены дополнительные численные исследования. Изучены их напряжённо-деформированное состояние и пластические деформации в условиях герметизации. Также проведены расчёты болтовых соединений, на основе которых сформулированы соответствующие технические рекомендации для новых моделей.

И в этой части работы численные результаты дополнены экспериментальными исследованиями. Эксперименты, проведённые на образцах, изготовленных на станках с ЧПУ, позволили оценить реальную степень герметизации новых моделей и сопоставить её с результатами моделирования. Полученное хорошее соответствие (в пределах нескольких микрон) свидетельствует об адекватности разработанных моделей. Анализ параметра R - длина следа деформирующей кромки на уплотнительном элементе, выполненный с помощью металлографических исследований, показывает, что новые CANDLE-модели обеспечивают более широкую зону герметизации, что, в свою очередь, снижает её газопроницаемость.

Резюмируя, отмечу основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые в работе получены зоны распределения напряжённо-деформированного состояния фланцевых соединений типа CF с учётом пластических деформаций как уплотнительного кольца, так и самих фланцев. Такой подход является ключевым для оценки реальной картины герметизации.
2. Экспериментально подтверждена достоверность результатов моделирования и разработаны технические рекомендации по оптимальному применению стандартных фланцев в условиях комнатной температуры и высоких температурных градиентов.

Полученные результаты уточняют наиболее эффективное применение стандартных моделей в СВВ ускорителей низких и высоких энергий.

3. Получены эмпирические зависимости для оценки деформации стандартных фланцев, которые могут быть использованы в инженерных расчётах.
4. Разработаны и предложены новые конструкционные решения фланцев, которые могут быть использованы в будущей ускорительной технике для проектирования более надёжных и устойчивых систем СВВ.

Полученные результаты автором корректно отражены в реферате, который всецело соответствует содержанию диссертации. Их достоверность подтверждается опубликованными 5-ю работами в виде докладов на научных конференциях и статей в научных изданиях.

Однако, диссертационная работа не лишена некоторых недочетов, замеченных и изложенных ниже:

1. В работе исследованы фланцы, изготовленные из нержавеющей стали марки 304L, однако не приведены чёткие пояснения относительно возможности обобщения полученных результатов на другие марки или материалы.
2. Для повышения полноты исследования было бы целесообразно также провести оценку герметизации новых геометрических решений при воздействии температурных градиентов.
3. Разработанные новые модели фланцев обладают очевидными преимуществами по геометрической стабильности по сравнению со стандартными решениями. Однако в рамках диссертации не проведено их взаимное сравнительное исследование, а также отсутствуют чёткие технические рекомендации относительно оптимальной области применения каждой из предложенных моделей.
4. Не проведены испытания на многократное использование новых геометрий фланцев; их улучшенная стабильность и надёжность обоснована лишь на основе измерений остаточных деформаций деформирующей кромки. При этом максимально

допустимое число циклов сборки-разборки для новых моделей остаётся неопределённым, хотя данный параметр является ключевым.

Однако, изложенные выше недочеты не носят принципиальный характер и не снижают высокий научный уровень выполненной работы.

Заключение

Оценивая представленную к защите диссертационную работу А. А. Давтяна на тему «Разработка технологии фланцевых соединений типа ConFlat в системах сверхвысокого вакуума», считаю, что она является солидным и целостным исследованием в научном и инженерно-техническом направлениях. В результате исследований предложены новые решения для CF-фланцевых соединений. Полученные результаты имеют важное значение для совершенствования СВВ и ускорительных систем и могут быть использованы в последующих научных и инженерных проектах.

Научный уровень выполненной диссертационной работы, ее объем и корректное оформление всецело удовлетворяют требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям Комитетом по высшему образованию и науке РА, а ее автор, А. А. Давтян заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности А.04.20 – «Физика пучков и ускорительная техника».

Официальный оппонент:

д.т.н., профессор Института Математики, Физики и Высших технологий

Российско – Армянского университета,  В. Г. Аветисян

Подпись В. Г. Аветисяна заверяю:

ученый секретарь Российско – Армянского университета,

к.ф.н., доцент  Р. С. Касабабова

22, апрель 2026 г.

