

# **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТЕНДА ИСПЫТАНИЯ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Н.В.Павлушин, Н.П. Бобырь, А.А. Тимашков, В.А. Рыбалко, Н.Н.Павлушин

## **АННОТАЦИЯ**

ПЕРСТ – это высокотехнологичный вакуумный стенд для испытаний безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД). Стенд оснащен системой высоковакуумной откачки, которая обеспечивает высокий вакуум с предельным давлением  $5 \cdot 10^{-4}$  Па, а при работе двигателя с натеканием 0.1 г/с по аргону в камеру имитации космоса -  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Конструкция вакуумной камеры позволяет удобно производить как мелкий ремонт, так и крупномасштабные ремонтные работы с использованием крановых механизмов. Для повышения качества измерений количество и положение патрубков, отведенных под диагностическую аппаратуру, были согласованы с учеными из НИЦ «Курчатовский институт».

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ИММИТАЦИЯ КОСМОСА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

## **CONSTRUCTIVE FEATURES OF ELECTRODELESS PLASMA ENGINE EXPERIMENTAL INSTALLATION**

N.V.Pavlushin, N.P. Bobyr, A.A.Tymashkov, V.A.Rybalko, N.N.Pavlushin

## **ABSTRACT**

PERST is a high technology experimental installation for electrodeless plasma rocket engine (EPRE) tests. The installation is equipped with a high-vacuum pumping system, which provides high vacuum with a maximum pressure of  $5 \cdot 10^{-4}$  Pa, and when the engine is running with 0.1 g/s leakage of argon into the space simulation chamber -  $1 \cdot 10^{-2}$  Pa. The design of the vacuum chamber makes it possible to conveniently carry out both minor repairs and large-scale repairs using crane mechanisms. To improve the quality of measurements, the number and position of nipples for diagnostic equipment were agreed upon with specialists from the Kurchatov Institute Research Center.

## **KEYWORDS**

PLASMA ENGINE, IMITATION OF SPACE, EXPERIMENTAL INSTALATION

## **ВВЕДЕНИЕ**

В рамках программы технического перевооружения экспериментально-стендовой базы плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» компанией ООО «Эрствак» разработана конструкция экспериментального стенда для исследования технических характеристик прототипов безэлектродных плазменных реактивных двигателей (БПРД). Стенд позволит сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» испытывать перспективные образцы БПРД и плазменных двигателей другого типа, общий вес которых не превышает 3 т и со следующими габаритами: диаметр 2м, длина 3м.

В мировой практике уже существует опыт создания крупногабаритных стендов для плазменных двигателей. Ярким примером может служить установка “El Monstruo”, разработанная в фирме “Ad Astra” для испытаний плазменного ракетного двигателя

(ПРД). Диаметр камеры составляет 4м, общая длина стенда - 10м и объем 150м<sup>3</sup>. Фото установки и ее схема представлены на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Фотография установки “El Monstruo”.

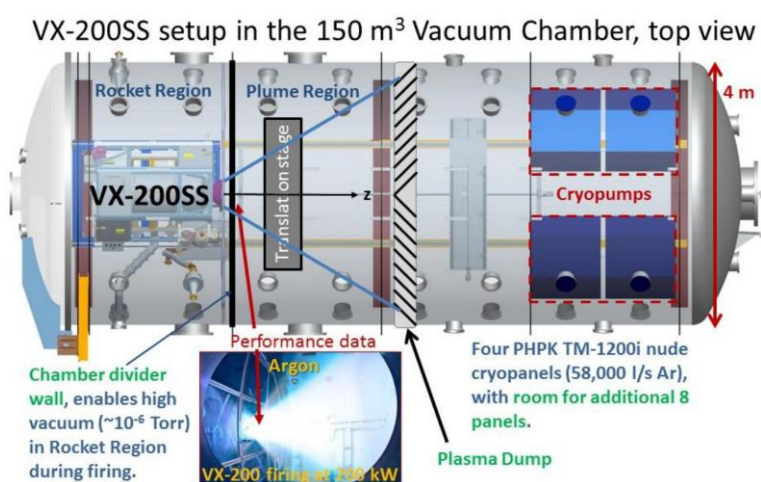


Рис. 2. Схема установки.

Камера состоит из двух изолированных мембраной (Chamber divider wall) отсеков: двигательного отсека (Rocket Region) и факельного отсека (Plume Region). Несмотря на интуитивно понятную схему, данная установка имеет ряд недостатков.

Важной особенностью камеры является внутреннее расположение криопанелей системы высоковакуумной откачки (cryopumps). Для того, чтобы защитить криопанели от разрушительного действия плазменного факела в камеру была вставленная «жертвенная панель» или плазменная перегородка (Plasma Dump). Таким образом, совместно криопанели и мембрана занимают большую часть исследовательского объема, а диагностическое пространство ограничивается третью факельного отсека.

Для того, чтобы расположить двигатель на камере предусмотрена распашная дверь со стороны двигательного отсека. Фотография открытой двери представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Распашная дверь камеры “El Monstruo”.

Процесс установки двигателя в камеру показан на рисунке 4.



Рис. 4. Процесс установки ПРД VASIMR 200 кВт в двигательный отсек камеры “El Monstruo”.

Как видно из рис.4 для того, чтобы установить ПРД в камеру, необходимо вручную подкатить тележку с ПРД к двигательному отсеку, состыковать рельсовые опоры тележки и опоры двигателя в камере, и далее перетащить двигатель к отверстию в мембране. При больших габаритах и массе двигателя данная процедура вызывает большие затруднения.

На рисунке 5 представлена платформа для размещения внутрикамерных диагностик.



Рис. 5. Диагностическая платформа для камеры “El Monstruo”.

Диагностическая платформа способна перемещаться как в осевом, так и в радиальном направлении благодаря двум сервоприводам, соединенными с передачей типа «винт-гайка». Данная платформа устанавливается в факельный отсек перед «жертвенной пластиной». Для того, чтобы заменить зонды, расположенные на платформе, необходимо пройти через распашную дверь камеры (рис.3) и дверь, расположенную в мембране. Если размер диагностической платформы превысит размер двери в мембране, то мембрану придется снять. Такая операция приведет к большим временным затратам и простою дорогостоящего оборудования.

Плазменный поток неизбежно взаимодействует со стенками камеры, вызывая их нагрев. Для охлаждения корпуса в установке “El Monstruo” были приварены водоохлаждаемые панели. Эти панели соединены друг с другом последовательно. Данное решение приводит к неравномерному охлаждению камеры. Теплообменные панели показаны на рисунке 6.



Рис. 6. Панели водяного охлаждения камеры “El Monstruo”.

В данной статье представлены конструктивные решения, предлагаемые компанией ООО «Эрствак» для устранения указанных недостатков стенда “El Monstruo”. На основе



представленных решений был разработан испытательный стенд для БПРД с названием ПЕРСТ.

## ОБЩАЯ СХЕМА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Общая схема испытательного стенда представлена на рисунке 7.

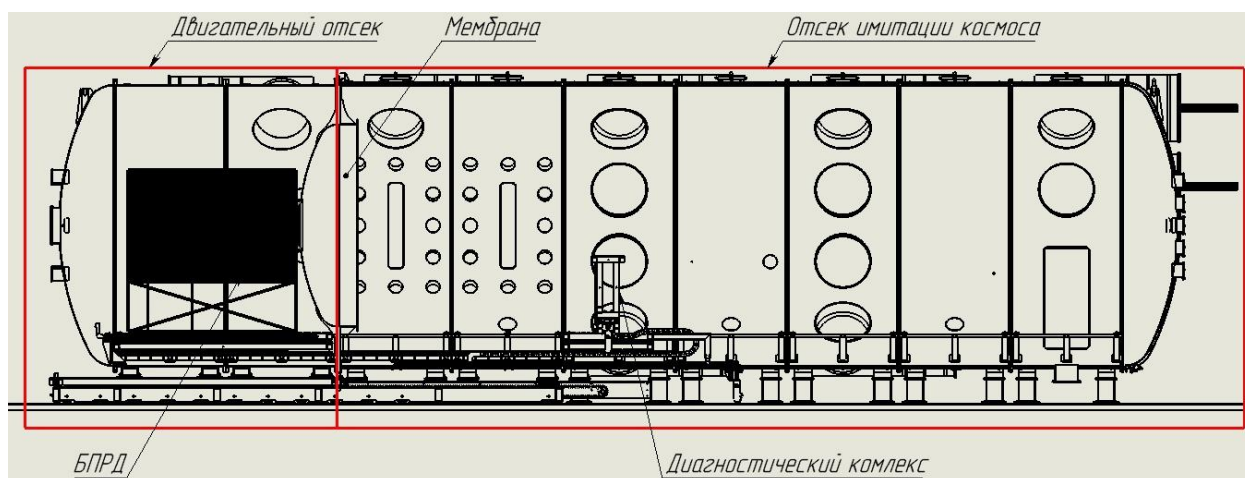


Рис. 7. Камера в разрезе.

Камера разбита на две изолированные мембраной отсека: двигательный отсек (ДО) и отсек имитации космоса (космический отсек - КО). Диаметр вакуумной камеры 5м, общая длина стенда составляет 20,7м, а объем пространства имитации космоса более 300м<sup>3</sup>. Каждый отсек разбит на секции длиной 2м каждая.

Секции КО выполнены с водяной рубашкой. Водяная рубашка обеспечивает равномерное охлаждение стенок камеры. Пример ее выполнения водяной рубашки показан на рисунке 8.

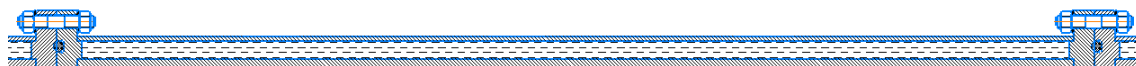


Рис. 8. Водяная рубашка.

Сама мембрана, по предложению от сотрудников НИЦ «Курчатовский институт», была выполнена с возможностью работы стенда при атмосферном давлении в ДО. Для этого была разработана мембрана уникальной конструкции, способная выдержать перепад давления в 1 атм.

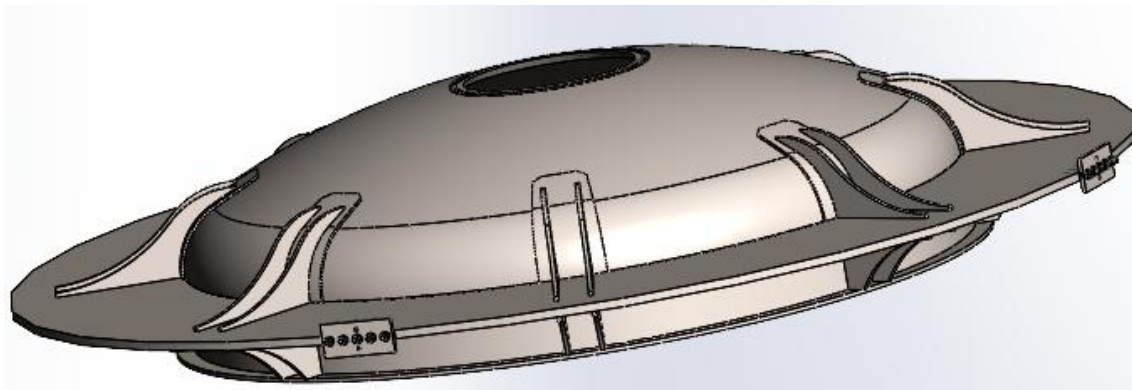


Рис. 9. Модель атмосферной мембраны.

БПРД крепится на монтажном столике телескопического механизма, расположенного в ДО. Присоединение как двигателя, так и измерительных систем к несущим конструкциям осуществляется через станочные столы с Т-образными пазами. Телескопический механизм позволяет выдвинуть двигатель из камеры на расстояние 4 м для проведения крупномасштабных ремонтных работ с применением крановых механизмов или для монтажа нового образца двигателя. Телескопический механизм и его движение представлено на рисунке 10.

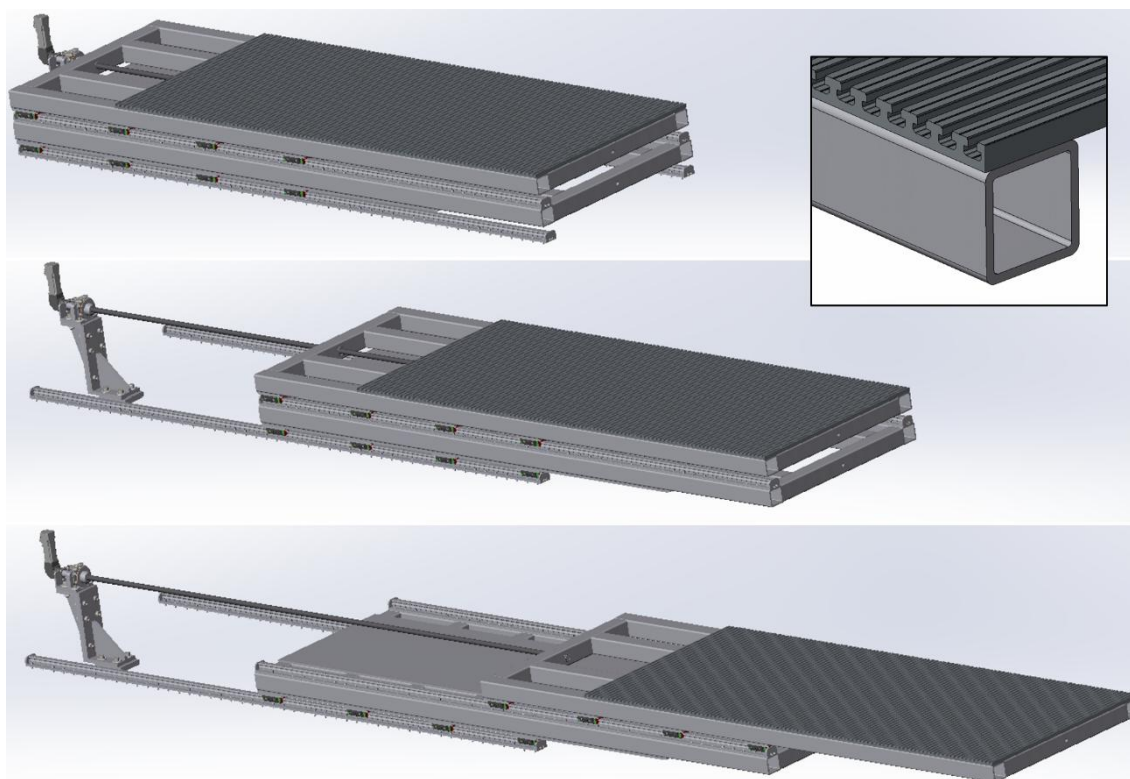


Рис. 10. Процесс выдвижения телескопической тележки двигателя.

Внутрикамерная диагностическая платформа (детальное описание платформы представлено в разделе «Диагностические возможности стенда») расположен в КО. Также, как и БПРД, этот комплекс располагается на телескопическом механизме, который также может выезжать за пределы камеры на расстояние 1,7 м.

ДО расположен на передвижной платформе с электромеханическим приводом и может отъезжать от основной камеры на 4 м для проведения крупных профилактических работ с двигателем или с диагностической платформой. При этом мембрана с помощью перецепного механизма может крепиться или к КО или к ДО.

Так, например, при необходимости проведения крупномасштабных работ с двигателем или его замены, перецепной механизм закрепляет мембрану на секции на КО. Далее передвижная платформа отводит ДО от КО на расстояние 4 м. Телескопический механизм выводит БПРД за пределы камеры, в подкрановую зону, предоставляя доступ к двигателю персоналу. Схема данного процесса представлена на рисунке 11.

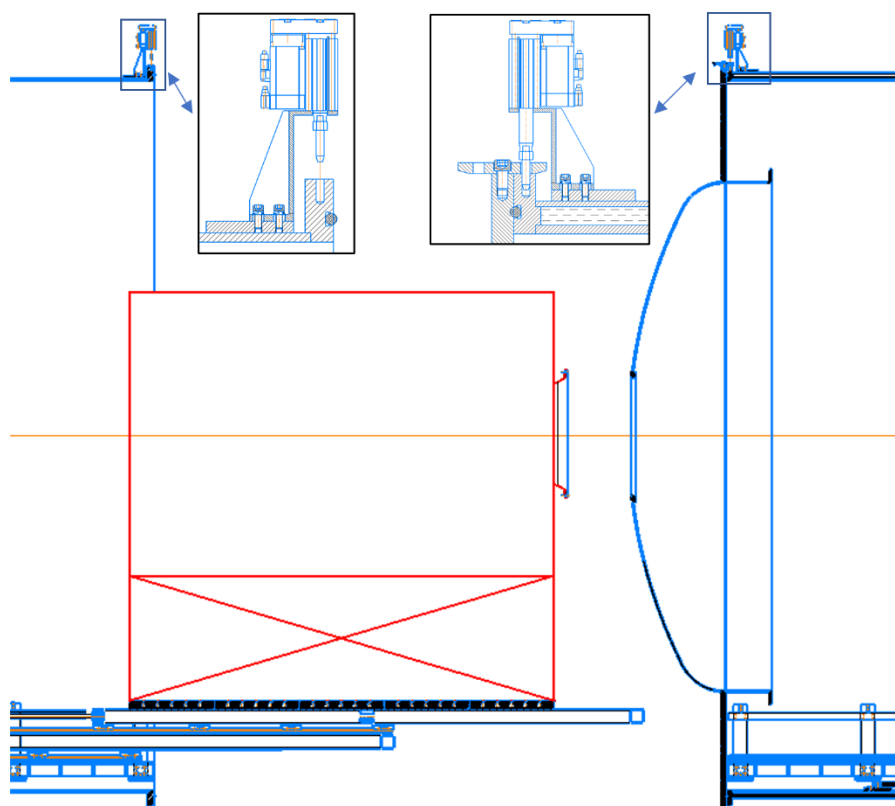


Рис. 11. Работа перецепного механизма при замене БПРД.

При необходимости установки на диагностическую платформу массивной крупногабаритной измерительной системы, перецепной механизм закрепляет мембрану на камере ДО. Как и в предыдущем случае, передвижная платформа отводится на 4 м вместе с ДО и мембраной. Диагностическая платформа благодаря своему телескопическому механизму выводится за пределы камеры, в подкрановую зону. Схема данного процесса представлена на рисунке 12.

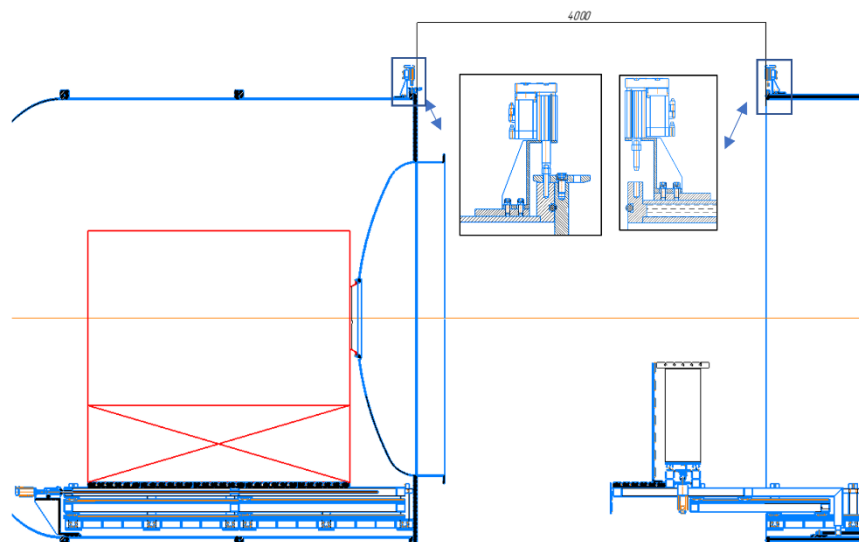


Рис. 12. Работа перецепного механизма при замене массивных габаритных измерительных систем.

Для проведения мелкого ремонта или пуско-наладочных работ, для которых нет необходимости откатывать передвижную платформу ДО, в ДО и КО монтированы технические двери высотой 1,8м и шириной 0,7м, удобные для входа персонала в камеру. Техническая дверь, расположенная на КО выполнена с водяной рубашкой.

В испытательном стенде криогенные насосы вынесены за пределы вакуумного объема. Поэтому исчезает острая необходимость в применении «жертвенной мембраны». Роль защитной мембраны выполняет газовая мишень. Газовая мишень – это газовый объем, образующийся в камере под воздействием плазменного факела. Ионизированные частицы и нейтральные молекулы в такой газовой прослойке теряют свой первоначальный импульс за счет межмолекулярных столкновений еще до того, как они достигнут стенок. Благодаря газовой мишени удается защитить стенки камеры и криогенные от разрушительного воздействия плазменного факела.

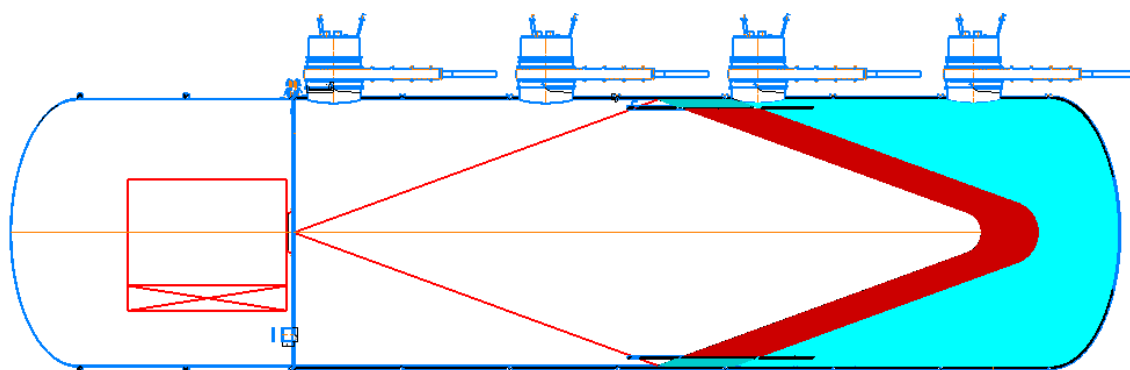


Рис. 13. Схематическое изображение области газовой мишени и области полного торможения плазменного факела.

Таким образом, испытательный стенд удобен для обслуживания как самого двигателя, так и для установки и замены измерительных систем, расположенных на диагностическом комплексе.



## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТЕНДА

Вопрос о количестве и размещении патрубков для диагностических целей решался в тесном сотрудничестве с сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт».

В итоговом проекте испытательный стенд содержит патрубки для лазерной и спектральной диагностики плазменного факела, патрубки для измерения давления в камере, патрубки для масс-спектрометров и других измерительных приборов. Дополнительно предусмотрены патрубки для смотровых окон. Также в ДО содержится большое количество патрубков, предназначенных для удобства эксплуатации БПРД. Расположены указанные патрубки в секциях ДО, первых двух секциях КО и крышках ДО и КО.

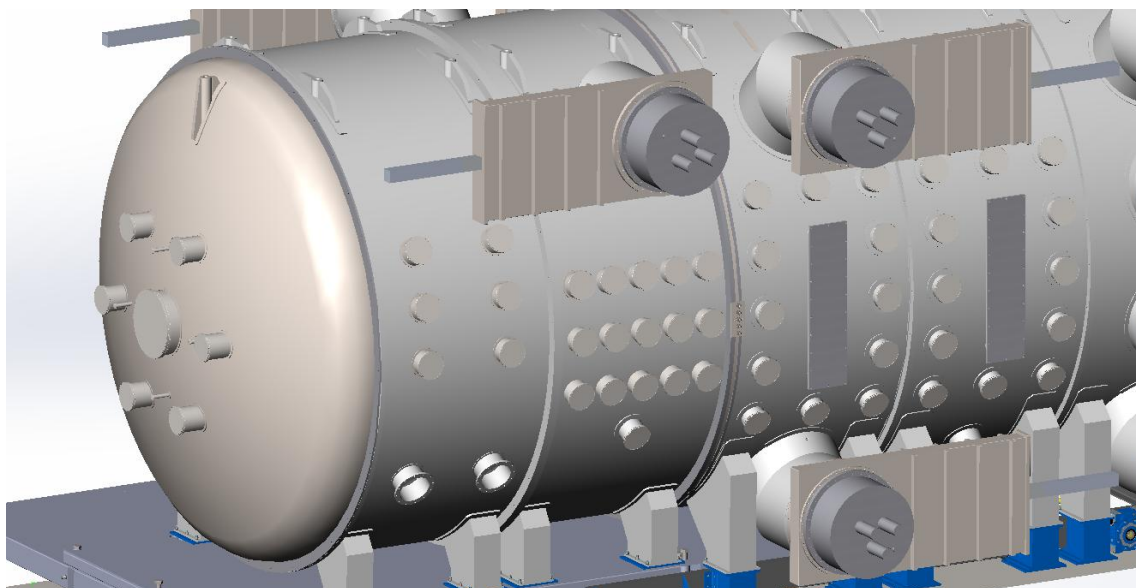


Рис. 14. Положение патрубков диагностических и рабочих патрубков.

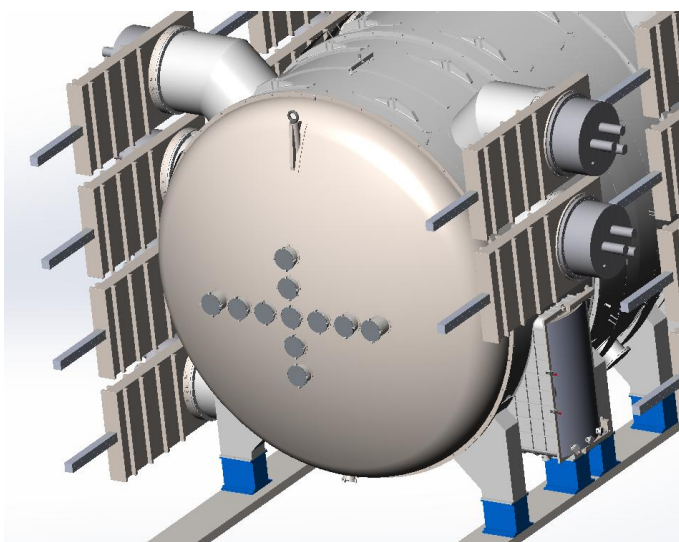


Рис. 15. Диагностические патрубки на крышке КИ

Для зондовой диагностики плазменного факела была предложена конструкция внутрикамерного диагностического комплекса. Конструкция данного комплекса представлена ниже.

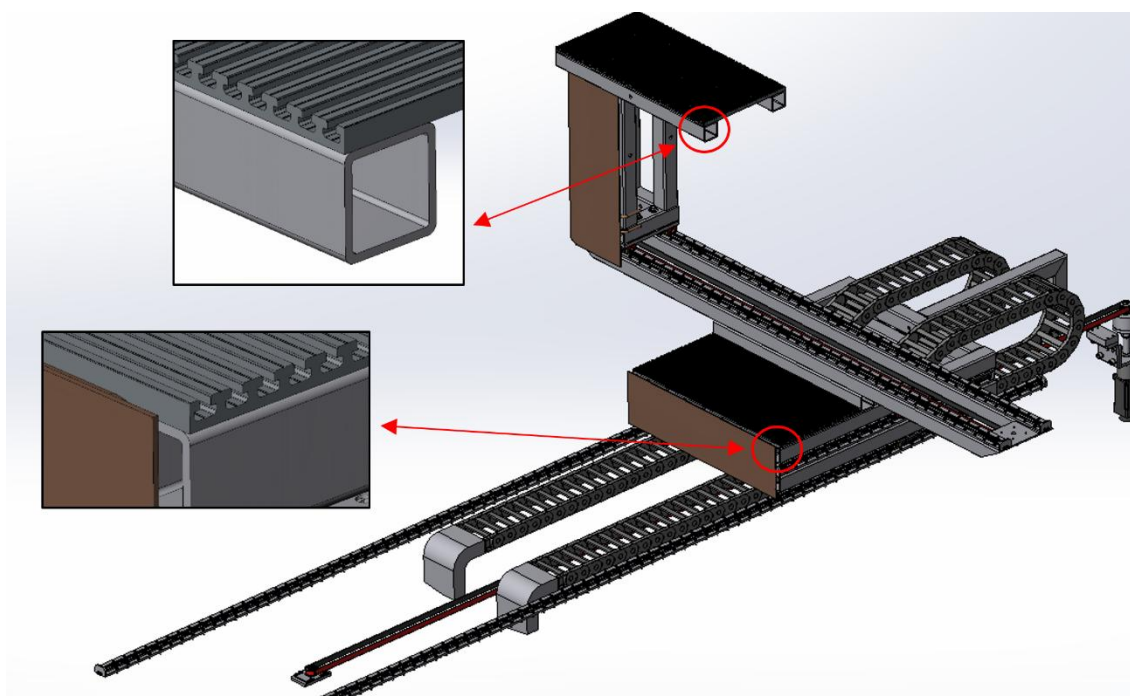


Рис. 16. Диагностическая платформа с телескопическим механизмом.

Диагностическая платформа включает в себя два монтажных стола. Один монтажный стол перемещается вместе с платформой вдоль оси камеры, а второй стол совершает перемещение как в осевом и радиальном направлениях. Скорость перемещения в осевом направлении составляет 0,5 м/с, а в радиальном – 5 м/с. При импульсном режиме работы двигателя с временем импульса в 0,1 с, возможно произвести измерение параметров плазмы вдоль всего диаметра плазменного факела. Ниже показаны крайние положения монтажных столов.

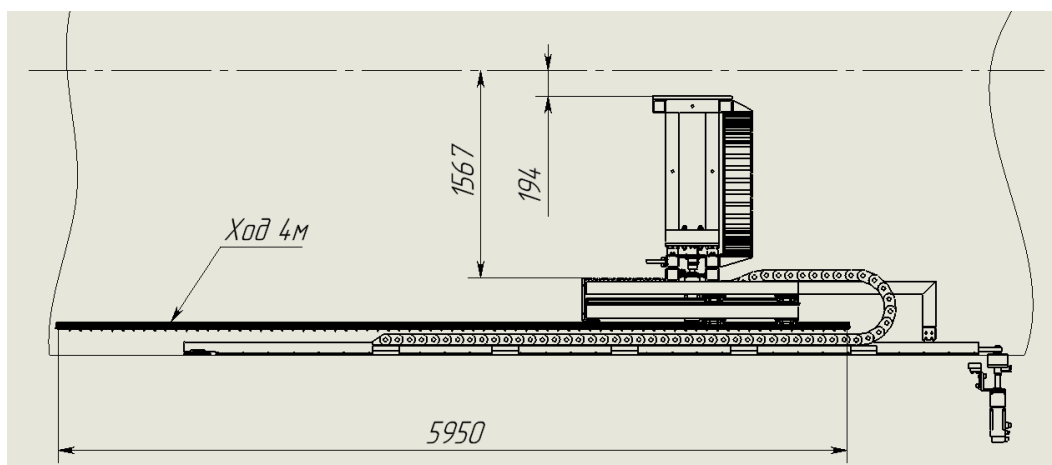


Рис. 17. Осевое перемещение диагностической платформы.

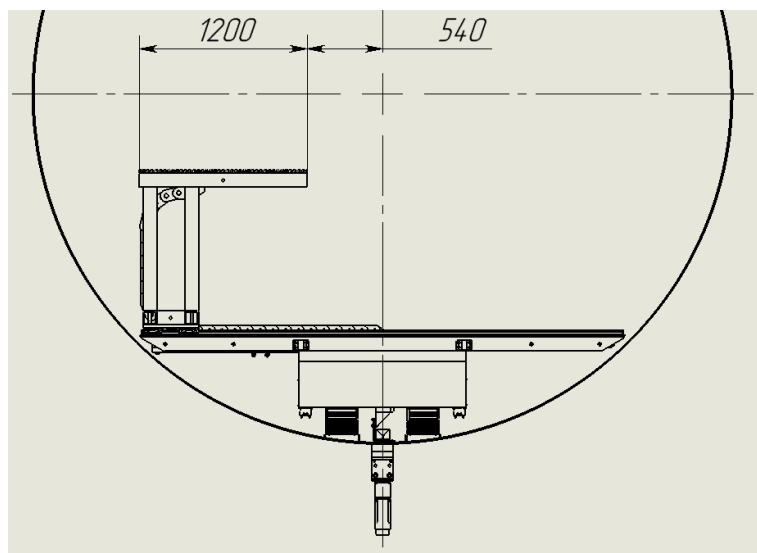


Рис. 18. Радиальное перемещение диагностической платформы.

Таким образом, испытательный стенд обладает удобной конструкцией для изучения режимов работы БПРД.

### **ВАКУУМНАЯ КАМЕРА И СИСТЕМА СТЕНДА**

Вакуумная система состоит из форвакуумной линии, оснащенной винтовыми насосами KDPH 1000-MG (4 шт.) и бустерными насосами Рутса ZJ-4000DV1 (4 шт.) и высоковакуумной системой откачки, содержащей криогенные насосы NP-90U-JIS (27 шт.), и турбомолекулярные насосы CXF 320/3000 (6 шт.) и EMT 4200 (2 шт.).

Форвакуумные насосы расположены в отдельном помещении. Камера подключена к форвакуумной линии через один патрубок Ду400, расположенном в КО. Для совместной форвакуумной откачки ДО и КО на мембране предусмотрен переключной клапан, который в открытом положении соединяет газовые объемы отсеков.

В системе регенерации криогенных насосов используются форвакуумные насосы. Также два турбомолекулярных насоса через шиберный затвор прикреплены к патрубкам ДО.

Патрубки для криогенных насосов расположены в секциях 2 (2 шт.), 3 (3 шт.), 5 (8 шт.), 7 (8 шт.) и 9 (6 шт.) (см.рис.). Для возможности регенерации криогенных панелей без остановки испытаний БПРД, криогенные насосы присоединены к КО через шиберные затворы. Расположение патрубков криогенных насосов показано на рисунке 19.

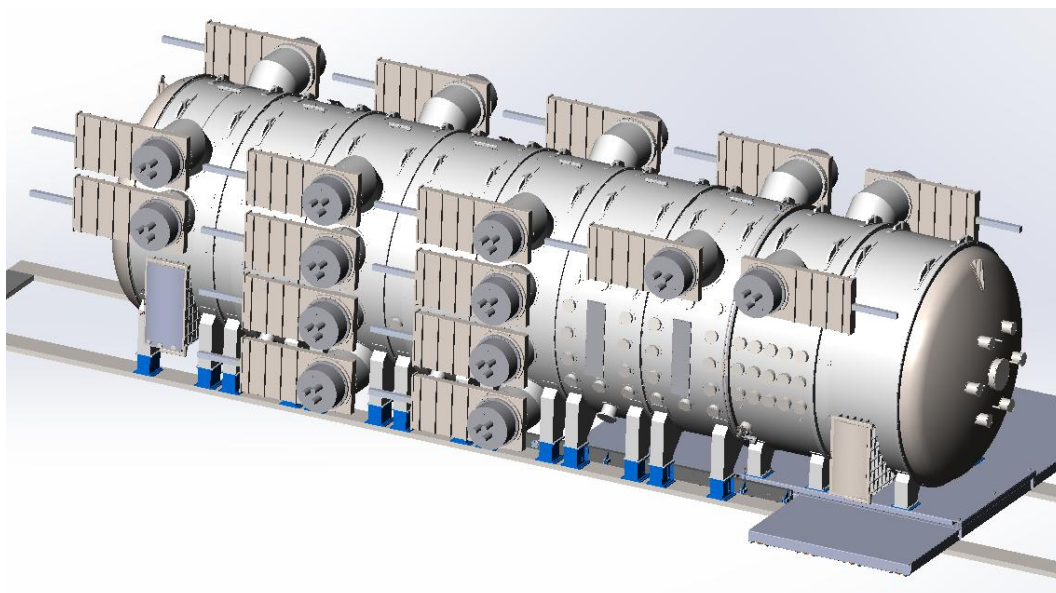


Рис. 19. Расположение криогенных насосов на камере

Тепловой поток, переносимый плазмой, может повредить криопанели криогенных насосов. Для ограничения тепловой нагрузки на криопанели, была сконструирована водоохлаждаемая ловушка. Конструкция данной ловушки представлена на рисунке ниже.

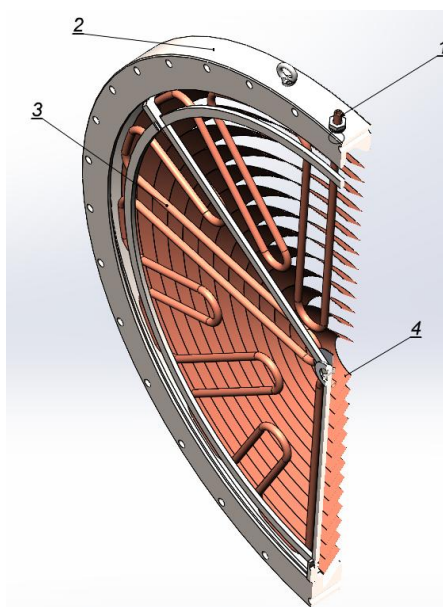


Рис. 20. Водоохлаждаемая жалюзийная ловушка. 1 – Ввод охлаждающей воды; 2 - корпус ловушки; 3 –Трубки водяного охлаждения; 4 – жалюзи.

Проводимость данной ловушки была рассчитана численным методом и составила  $92 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Существует два возможных режима откачки камеры: откачка при одновременном захолаживании криопанелей (время выхода на рабочую температуру 1.8 часа) и в случае, если криопанели уже захолажены до рабочей температуры.

Расчет изменения давления в камере при откачке проводился на основе зависимостей проводимостей элементов вакуумопроводов для различных режимов течения газов (вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный), изложенных в [4].

Дополнительно учитывались поперечное газовыделение со всех элементов, находящихся в вакууме с учетом их изменения во времени. Натекание от конденсированной на внутренней поверхности камеры влаги рассчитывалось по соотношению Фрейдлиха. Расчет проводился на базе программного пакета MathCad15.

Ниже приведен результат расчета откачки до давления в  $5 \cdot 10^{-4}$  Па в случае незахоложенных крионасосов с учетом натекания от внутренних поверхностей камеры. Время откачки составляет 1 час 50 мин.

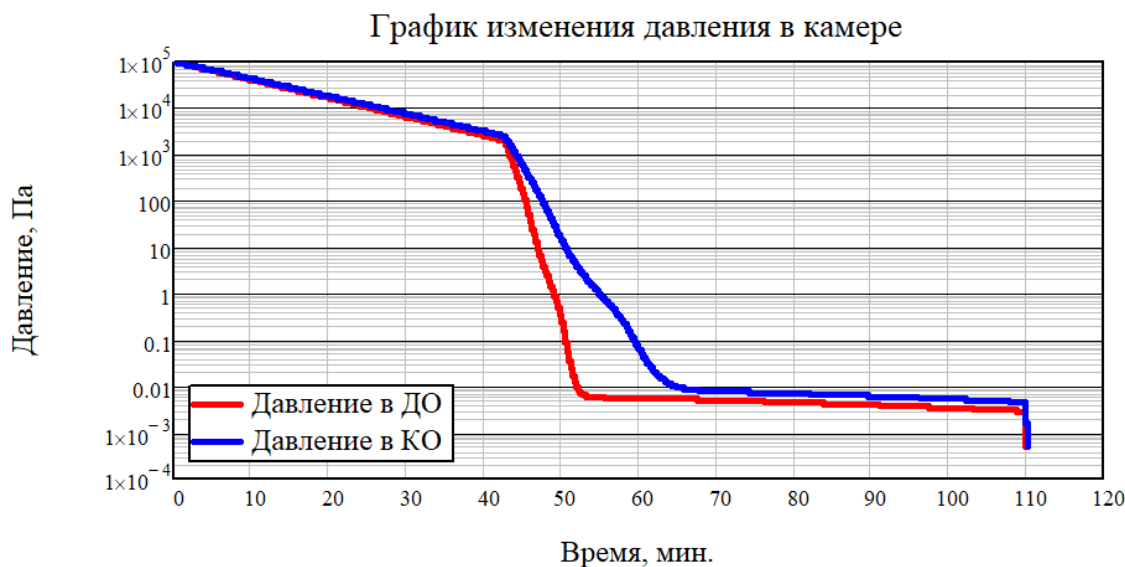


Рис. 21. График откачки камеры с учетом времени их выхода на рабочую температуру.

Результат расчета для случая, в котором крионасосы захлажены до рабочей температуры, представлен на рисунке 22. Время откачки составляет 55 мин.

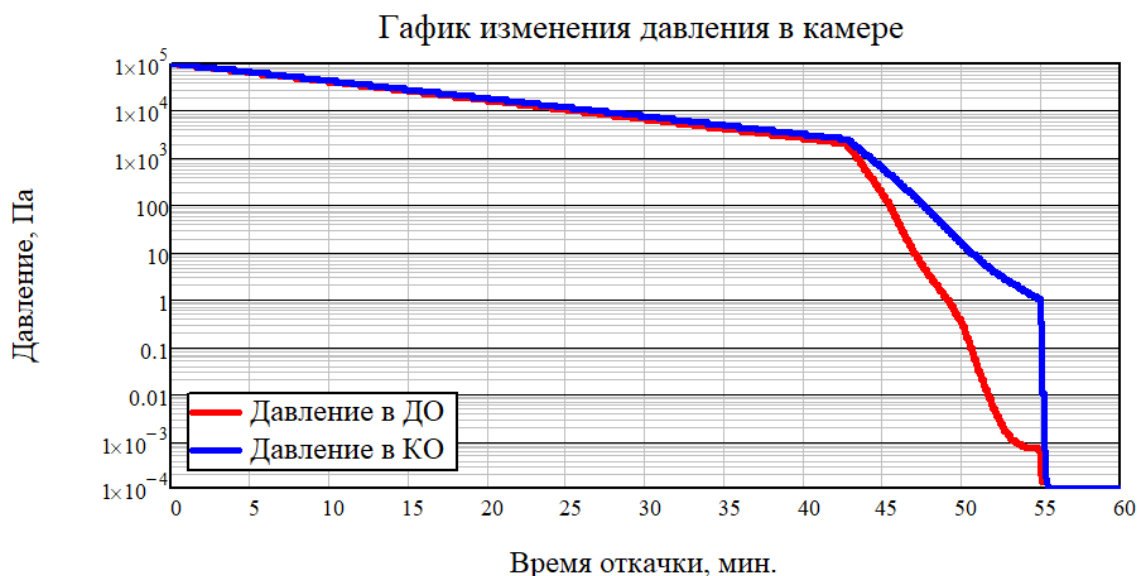


Рис. 22. График откачки камеры крионасосов без учета времени их выхода на рабочую температуру.

При импульсном режиме работы двигателя с натеканием в камеру  $0.1 \text{ г/с}$  аргона, при работе 7 крионасосов, давление в камере составляет  $10^{-2}$  Па. Зависимость среднего



давления в камере от времени при импульсном режиме работы двигателя представлено на рисунке 23.

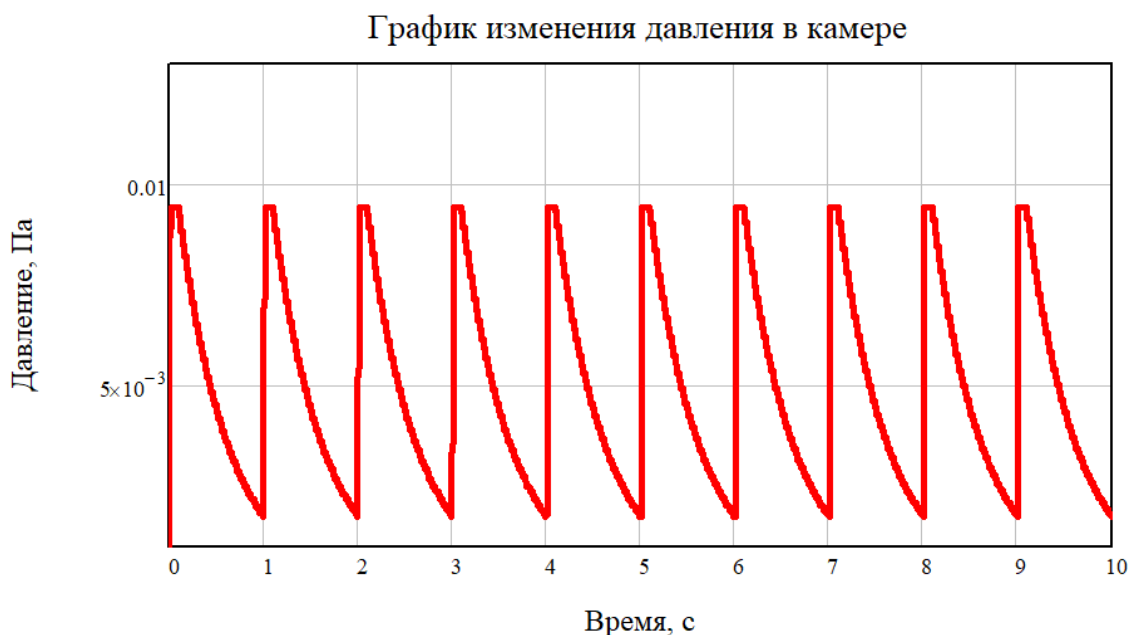


Рис. 23. Зависимость давления в камере от времени при импульсном режиме работы двигателя.

Расчет на прочность и устойчивость были проведены двумя способами: по ГОСТ 34233 Сосуды и аппараты под давлением и методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Примеры результатов расчетов по методам конечных элементов приведены на рисунке 24:

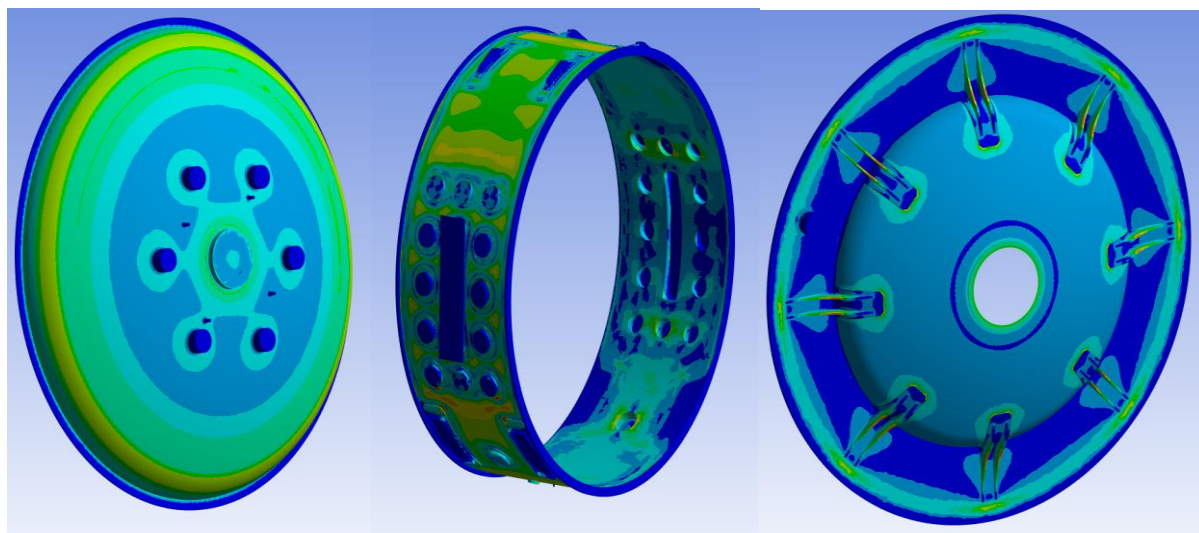


Рис. 24. Результаты расчета на прочность методом конечных элементов.

Таким образом, система откачки стэнда позволяет создавать вакуум в КО, достаточный для имитации работы БПРД в космическом пространстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стенд – высокотехнологичный и удобный в эксплуатации экспериментальный стенд для изучения эксплуатационных характеристик прототипов плазменных двигателей.

Технические решения, принятые при разработке стенда позволяют с удобством обслуживать как и сам двигатель, так и внутрикамерные измерительные комплексы. оснащён достаточным количеством патрубков для детальной диагностики плазменного факела и других целей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cassady L. et al. VASIMR technological advances and first stage performance results //45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2009. – С. 5362.
2. Longmier B. W. et al. Superconducting 200 kW VASIMR® Experiment and Integrated Testing. – 2009.
3. Franklin R. Chang Díaz. et al. Recent Progress on the VASIMR® Engine // 37th International Electric Propulsion Conference Massachusetts Institute of Technology • Cambridge, MA • USA June 19 – 23, 202237th International Electric Propulsion Conference Massachusetts Institute of Technology • Cambridge, MA • USA June 19 – 23, 2022.
4. Вакуумная техника: справочник / К.Е.Демихов, Ю.В.Панфилов, Н.К.Никулин и др.; В 14 под общ ред. К.Е.Демихова, Ю.В. Панфилова, 3-е издание, перераб. И доп. / М:Машиностроение, 2009. 905с. – ISBN 978-5-94275-436-5 – УДК 621.52

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлушин Николай Викторович – главный конструктор компании ООО «Эрствак», Москва, ул. Электрозаводская 23с8. e-mail: n.pavlushin@erstvak.com

Бобырь Николай Павлович – заместитель начальника отдела НИЦ «Курчатовский институт», площадь Академика Курчатова, 1. e-mail: Bobyry\_NP@nrcki.ru

Тимашков Артем Александрович – главный инженер-начальник проектного отдела ООО «Эрствак», Москва, ул. Электрозаводская 23с8. e-mail: at@erstvak.com

Рыбалко Василий Александрович – технический директор ООО «Эрствак», Москва, ул. Электрозаводская 23с8. e-mail: v.rybalko@erstvak.com

Павлушин Никита Николаевич – инженер-конструктор компании (ORCID: 0009-0007-5259-7135) ООО «Эрствак», Москва, ул. Электрозаводская 23с8. e-mail: n.n.pavlushin@erstvak.com