

СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СИНХРОТРОНАХ

*А. М. Базанов, А. В. Бутенко, А. Р. Галимов, А. К. Луговнин, А. В. Смирнов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Достижение сверхвысокого вакуума в коллайдере и бустере проекта NICA является одной из основных задач при его создании, что определяет необходимость серьезного подхода к этому вопросу и проведения исследовательских работ в этом направлении. В первую очередь необходимо понимать, как влияют на степень вакуума различные компоненты вакуумных систем. Также необходимо провести исследования откачных средств на требуемую для пучковой камеры величину вакуума (10^{-9} Па) и выбрать наиболее оптимальную схему откачки. В то же время необходимо выяснить, как влияют на величину вакуума и на состав остаточного газа различные операции, проводимые с вакуумной камерой: подготовка вакуумных поверхностей, напуск атмосферы, прогрев камеры после закрытия. Из-за сложности поддержания постоянной температуры стенок пучковой камеры, в том числе на внутренних элементах, значение температуры может варьироваться от комнатной до температуры жидкого гелия. Это усложняет процессы, проходящие внутри нее. Дополнительные трудности возникают в результате разогрева стенок камеры от различных процессов во время работы ускорителя (например, циклирование магнитного поля).

One of the main challenges in the booster and collider of the NICA project is achieving the ultra-high vacuum, which determines the need for a serious approach to this issue and research in this direction. The first thing to be understood is the effect on the degree of vacuum of the vacuum systems of the various components. It is also necessary to carry out studies of pumped funds required for the beam-size vacuum chamber (10^{-9} Pa) and choose the most optimal scheme of pumping. At the same time one needs to figure out how the degree of vacuum and the composition of the residual gas influence the various operations carried out with the vacuum chamber: the preparation of vacuum surfaces, lapping the atmosphere, warming the chamber after closing. Due to the difficulty of keeping constant temperature of the beam chamber walls, including the inner member, the temperature may vary from room temperature to liquid helium temperature. This complicates the processes taking place within it. Additional complexity arises from the heating of chamber walls by various processes during the operation of the accelerator (for example, cycling the magnetic field).

PACS: 29.20.-c; 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

Получение сверхвысокого вакуума в заданном диапазоне 10^{-8} – 10^{-10} Па очень сложная задача для ускорителей заряженных частиц. Для сверхпроводящих ускорителей главным остаточным газом является водород, который не может эффективно замораживаться

¹E-mail: smirnov@jinr.ru

на стенках камеры даже при температуре жидкого гелия. Быстро нарастающее магнитное поле в сверхпроводящих синхротронах приводит к нагреву вакуумной камеры и, следовательно, к испарению водорода со стенок вакуумной камеры.

В атмосфере главными газовыми компонентами являются азот и кислород. Остальные газы, такие как вода, аргон, диоксид углерода, составляют менее 1% от всего объема воздуха. Газовый состав в вакууме варьируется в зависимости от многих факторов: выбора материала, чистоты, прогрева вакуумной системы, типа насосов, температурного режима, фотонной, электронной или ионной бомбардировки поверхности и т. д.

Вода — главный газ в непрогретых вакуумных металлических камерах. Дегазация воды существенно не зависит от природы металла при обработке поверхности и температурных условий (при температурах менее 110 °С). В настоящее время практически не существует методов, кроме прогрева, для удаления воды с поверхности металлов.

При получении сверхвысокого вакуума водород является главным остаточным газом, который десорбируется с поверхности металла. Процесс обезгаживания от водорода зависит от свойств металла и пропускной способности поверхности при постоянной температуре. Прогрев при высокой температуре (вплоть до 900 °С) уменьшает содержание водорода на поверхности более чем на два порядка.

Молекулы газа растворяются в объеме материала во время процесса обработки из-за их постоянного наличия в воздухе. В вакууме такие молекулы диффундируют к поверхности металла, после чего испаряются. Только у атомов водорода есть достаточно мобильности в металле, чтобы достичь поверхности, где они успевают соединиться в молекулу H₂.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРИТЕЛИ

Сегодня несколько сверхпроводящих ускорителей заряженных частиц в мире работают в условиях сверхвысокого вакуума. В зависимости от особенностей конструкции ускорителей используются различные подходы при достижении сверхвысокого вакуума.

Коллайдер LHC. В Большом адронном коллайдере (LHC, CERN, Швейцария), протяженность которого составляет 27 км, поддерживается сверхвысокий вакуум на уровне 10⁻¹⁰ Па. Криогенные камеры имеют температуру 1,9 К, которая позволяет очень эффективно заморозить водород на стенках камеры (рис. 1). Специальный защитный экран используется в пучковой камере, чтобы предотвратить нагрев наружной оболочки, которая находится при гелиевой температуре [1].

Все стенки камеры при комнатной температуре откачиваются с помощью NEG-насосов. Устройства для нанесения NEG-покрытий на стенки вакуумных камер были специально построены в CERN. Более 1300 камер были подготовлены с использованием TiZrV NEG для LHC. Стандартная длина камеры 7 м, диаметр 80 мм [2].

SIS100 проекта FAIR. Сверхпроводящий синхротрон SIS100 будет построен в рамках нового проекта FAIR (Германия) [3]. Общая длина кольца 1083,6 м (82% холодных участков, 18% теплых), основная структура гексагональная — шесть прямых и шесть арок, 25 теплых участков (24 × 9,1 м, 1 × 3,3 м), 25 холодных секций (6 арок 5 × 135 м, 1 × 122,6 м), 19 коротких прямых участков (18 × 4,3 м, 1 × 9,2 м).

Внутренние стенки камеры используются в качестве эффективного криогенного насоса с практически бесконечной мощностью для почти всех видов конденсируемых газов.

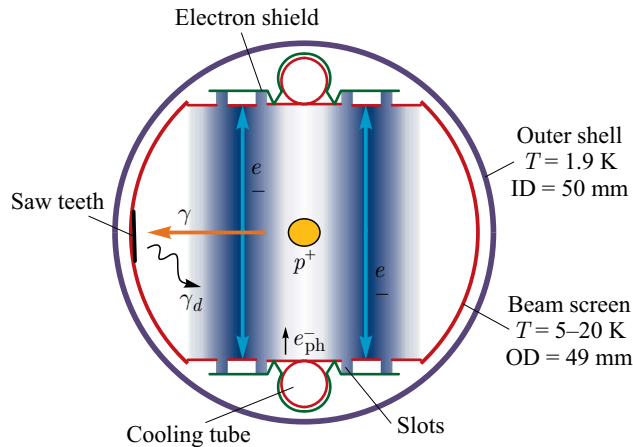


Рис. 1. Конструкция криогенной вакуумной камеры LHC

Статическое давление вакуума внутри камеры около 10^{-10} Па, в динамических условиях хуже чем 10^{-9} Па. Из-за быстрого нарастания магнитного поля вихревые токи нагревают стенки камеры до температур > 20 К [4].

Для откачки водорода в криогенных камерах установлены по 10 криосорбционных насосов на арку (длина арки 13 м) и по одному на каждый короткий квадрупольный дуплет на прямолинейных участках. Криосорбционный насос состоит из нескольких круглых криопанелей (медные диски, покрытые углем (рис. 3)), которые охлаждаются до $T \sim 4,5$ К [5].

Бустер проекта NICA. В рамках реализации проекта NICA будет создана цепочка сверхпроводящих ускорителей [6]. Сверхпроводящий синхротронный бустер будет использоваться для накопления и ускорения ионов золота. На следующем шаге частицы выводятся из бустера в сверхпроводящий синхротрон нуклотрон, где частицы собираются в сгустки и ускоряются до энергии эксперимента. Наконец, частицы сгустками поступают из нуклотрона в сверхпроводящее кольцо коллайдера.

Вакуумные условия в ускорителях определяются продолжительностью жизни пучка в процессе накопления и ускорения. Необходимые вакуумные условия бустера и коллайдера оцениваются на уровне 10^{-9} Па. Рабочее давление на нуклотроне составляет около 10^{-7} Па, что было достигнуто в ходе модернизации вакуумной системы нуклотрона в течение 2007–2011 гг. [7].

Периметр бустера составляет порядка 210 м, а оптическая структура состоит из четырех прямолинейных участков длиной около 7,5 м, находящихся при комнатной температуре, и четырех арок, находящихся при криогенных температурах. Магнитная структура арок состоит из шести дуплетов квадрупольных линз (фокус–дефокус) и попарно стоящих 10 дипольных магнитов (рис. 2). На каждом дуплете квадрупольных линз будут установлены вакуумные посты откачки, расстояние между которыми составляет 8,79 м. 2/3 этой длины составляют вакуумные камеры с внутренним эллиптическим сечением 128×65 мм, а 1/3 длины — камеры с круглым сечением диаметром 160 мм. Малое поперечное сечение эллиптических камер создает серьезные проблемы для достижения сверхвысокого вакуума.

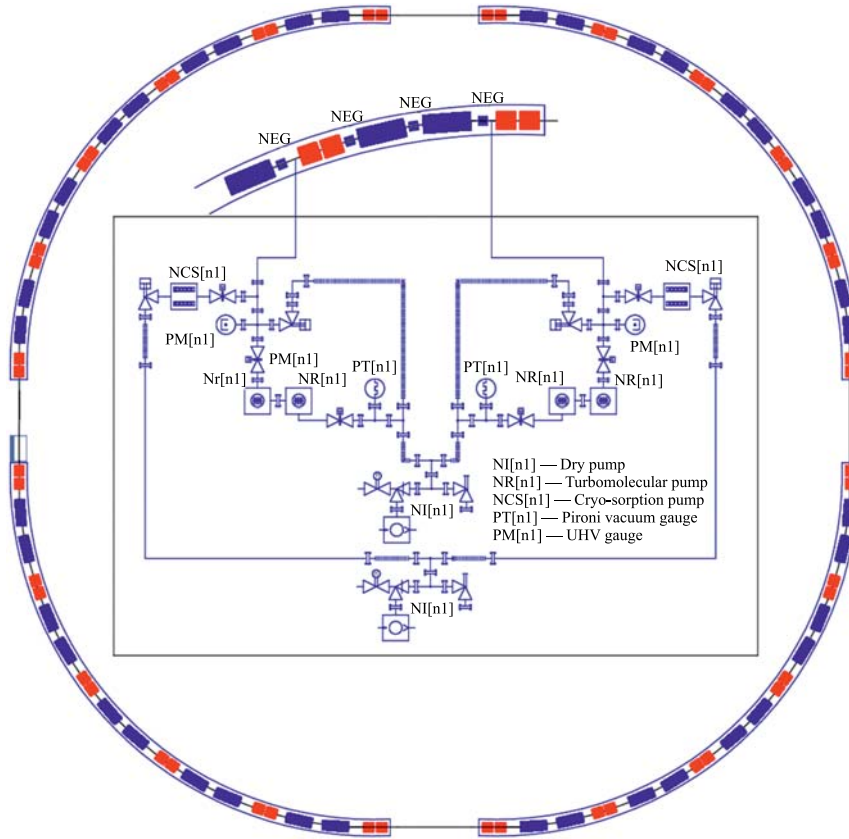


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Структура бустера: красный (серый) цвет — квадруполи; синий (черный) — диполи

Расчеты с помощью программы ВЕТАСООЛ [8] показывают, что равновесное давление между постами откачки на порядок хуже, чем непосредственно в районе поста откачки (рис. 3). Если технология изготовления вакуумных камер позволит при криогенных температурах достичь скорости натекания водорода с поверхности камеры на минимальном уровне $5 \cdot 10^{-11}$ Па м/с [9], то скорости откачки постов 300–500 л/с будет вполне достаточно, чтобы получить необходимый средний вакуум по кольцу на уровне 10^9 Па (рис. 3, кривая 1).

Расчеты показывают, что величина среднего вакуума прямо пропорциональна уровню гажения водорода со стенок камеры при одинаковой скорости откачки вакуумного поста. И если качество изготовления поверхности камер окажется недостаточным для получения минимального уровня гажения водорода, то средний вакуум по кольцу может оказаться в несколько раз хуже требуемого. При этом из-за плохой проводимости вакуумных камер увеличение скорости откачки поста не приводит к существенному снижению величины среднего давления по кольцу (рис. 3, кривая 2).

Одним из способов решения проблемы плохой проводимости камер является установка распределенных средств откачки. Так, если на участках между магнитами устано-

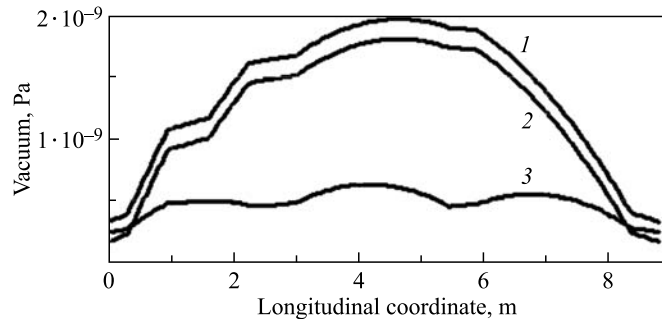


Рис. 3. Распределение вакуума в арке бустера между постами откачки. 1 — скорость откачки $S = 500$ л/с, средний вакуум $P_{av} = 1,4 \cdot 10^{-9}$ Па; 2 — $S = 1000$ л/с, $P_{av} = 1,2 \cdot 10^{-9}$ Па; 3 — $S = 300 + 100 + 100$ л/с, $P_{av} = 2,9 \cdot 10^{-10}$ Па

вить дополнительные средства откачки всего лишь со скоростью откачки до 100 л/с, то средний вакуум улучшится почти в пять раз (рис. 3, кривая 3). Выбор типа насоса для организации распределенной откачки является принципиальной задачей для достижения необходимых вакуумных условий.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ

Сверхвысокий вакуум в ускорителях частиц можно получить с помощью различных систем откачки. Турбомолекулярные насосы ограничены давлением 10^{-9} Па и могут применяться только для предварительной откачки. Ионные насосы не могут использоваться для эффективной откачки водорода, но могут эффективно использоваться в связке с другими откачными системами. Распределенными средствами откачки для достижения сверхвысокого вакуума могут выступать криосорбционные насосы, нераспыляемые и распыляемые геттеры.

Криосорбционные насосы. Криосорбционные насосы (см. рис. 4) — наиболее известные системы для получения сверхвысокого вакуума в сверхпроводящих ускорителях. Ключевой особенностью метода является низкое давление насыщенных паров, т. е. давление в газовой фазе в равновесии с конденсатом при заданной температуре. Такие элементы, как неон, водород и гелий, являются основными остаточными газами при давлении лучше, чем 10^{-9} Па, и температуре 20 К. Давление паров водорода при температуре 4,3 К находится в пределах 10^{-5} Па, а при температуре 1,9 К — ниже 10^{-10} Па.

Криосорбция основывается на притяжении между молекулой и поверхностью. Это взаимодействие сильнее, чем между теми же молекулами. Молекулы газа откачиваются при давлении много меньшем, чем давление насыщенных паров, когда количество адсорбированных молекул менее одного монослоя. Пористые материалы используются в криосорбции для улучшения полезной поверхности. К примеру, у угля полезная поверхность составляет 1000 м²/г. Важно, что основную часть водорода можно откачать при температуре 20 К, а гелий только при температуре 4,3 К.

Основной проблемой в использовании криосорбционных насосов в качестве распределенной откачки является создание дополнительных криогенных систем для циркуляции

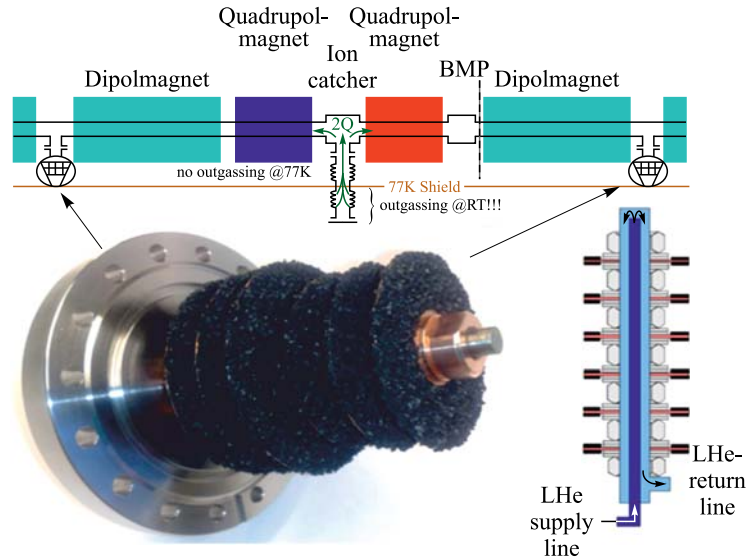


Рис. 4. Конструкция криосорбционных насосов

жидкого гелия через тело насоса. Так, в кольце SIS100 специально создаются гелиевые коммуникации, отдельные от криогенной системы обеспечения сверхпроводящих магнитов.

Нераспыляемые геттеры. Нераспыляемые геттеры (Non Evaporable Getters — NEG) обычно используются при комнатной температуре. Во время работы насоса газы диффундируют внутрь геттерного материала. Компания SAES выпускает широкий ассортимент как отдельных NEG-насосов (рис. 5), так и в комбинации с ионными насосами [10]. Откачиваемые ими газы разделяют на 4 группы:

- водород и его изотопы — сорбируются обратимо;
- CO, CO₂, O₂ и N₂ — сорбируются необратимо;
- H₂O, C_xH_y — сорбируются обратимо и необратимо;
- благородные газы — не сорбируются вообще.

Разложение оксидного слоя возможно только в металлах, имеющих очень высокий предел по растворимости кислорода, а именно элементы четвертой группы: титан, цир-

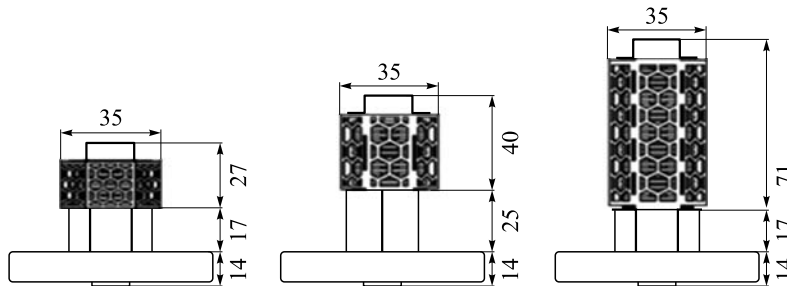


Рис. 5. Конструкция NEG-насосов компании SAES: SapaciTorr 50, 100, 200

коний и гафний. NEG-материалы изготавливаются промышленным способом с использованием порошковой технологии. Малые фрагменты запекаются в форме гранул, дисков или пластин. Порошок можно также спрессовать при комнатной температуре с помощью металлической ленты. NEG-насосы могут быть использованы в сочетании с ионными насосами.

Во время активации насоса газы безвозвратно диффундируют внутрь тела насоса, за исключением водорода, который выделяется из тела насоса во время активации. Температура активации является функцией от времени активации и зависит от материала. NEG частично активируется во время прогрева при $T \sim 250^\circ\text{C}$. Полная скорость откачки получается после нагревания при 400°C в течение 45 мин или 300°C в течение 24 ч при рабочем давлении $P < 10^{-3}$ Па. NEG-насосы могут быть активированы более 50 раз без существенной потери характеристик. Для увеличения количества активаций необходимо увеличивать либо температуру, либо время активации.

До сегодняшнего дня NEG-насосы не использовались при криогенных температурах. Тем не менее ранние эксперименты показывают, что NEG имеют достаточно хорошую скорость откачки H_2 при температуре, близкой к температуре жидкого азота [11]. При температуре, близкой к температуре жидкого гелия, скорость откачки стремится к нулю, так как прекращаются химические процессы на поверхности насоса. Главным недостатком такого насоса при использовании в качестве распределенной откачки на сверхпроводящем ускорителе является невозможность его повторной активации после захлаживания вакуумной камеры до криогенных температур. В этом случае NEG-насосы можно активировать только до начала захлаживания кольца (до криогенных температур).

Распыляемые геттеры. Титановые сублимационные насосы (Titanium sublimation pump — TSP) достаточно широко применяются в ускорителях заряженных частиц для достижения сверхвысокого вакуума для откачки водорода и азота. TSP часто используются в комбинации с ионными насосами, которые эффективно откачивают инертные газы. В основном TSP применяются в вакуумных камерах, имеющих комнатную температуру, и для более эффективной откачки воды TSP могут комбинироваться с азотными ловушками.

Конструкция титановых насосов представляет собой нагреватель, на который нанесена титановая спираль (рис. 6). После достижения некоторого давления (лучше 10^{-5} Па) производится активация геттера путем нагрева его до температуры плавления титана по-

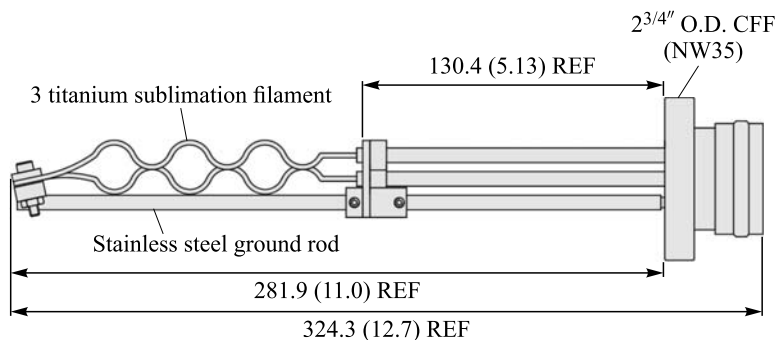


Рис. 6. Титановый сублимационный насос компании «Agilent» [12]

рядка 1000 °С в течение нескольких минут. Цикл активации TSP может повторяться многократно для достижения требуемых вакуумных условий.

Использование TSP для организации распределенной откачки в вакуумной камере бустера проекта NICA может иметь два преимущества по сравнению с NEG-насосами. Во-первых, титановые геттеры могут работать при любых криогенных температурах без существенного снижения скорости откачки. Во-вторых, время активации TSP составляет всего несколько минут, что может быть использовано даже в криогенных камерах при разработке специальной конструкции титанового насоса, позволяющей предотвратить резкий рост температуры вакуумной камеры в ходе активации геттера.

ВАКУУМНЫЙ СТЕНД ОИЯИ

В сотрудничестве с компанией «Vakuum Praha» [13] в ОИЯИ был создан вакуумный стенд для тестирования вакуумных камер и средств высоковакуумной откачки. После процедуры прогрева в течение 30 ч при температуре 280 °С был достигнут вакуум 10^{-9} Па [14]. Сверхвысокий вакуум при комнатной температуре был достигнут комбинацией ионного насоса и сублимационного насосов с азотной ловушкой производства компании «Agilent» [12].

Для тестирования вновь создаваемых пучковых камер при криогенных температурах произведена модернизация существующего стенда (рис. 7). В связи с тем, что вакуумная камера после охлаждения находится при температуре ниже температуры жидкого азота, основными составляющими остаточного газа являются гелий и водород, для откачки которых и предполагается протестировать различного типа насосы в условиях крио-

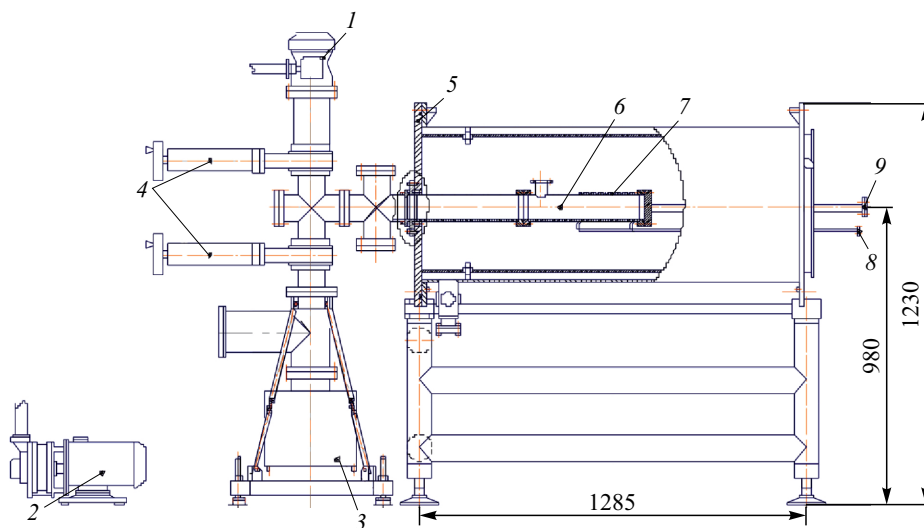


Рис. 7. Сверхвысоковакуумный криогенный стенд ОИЯИ: 1 — турбомолекулярный насос; 2 — диффузионный насос; 3 — магниторазрядный насос; 4 — металлические шиберы; 5 — дюрелевый фланец; 6 — высоковакуумная камера; 7 — трубка с жидким гелием; 8, 9 — подключаемые гелиевые и азотные коммуникации

женных температур. Результаты тестирования позволят выбрать тип насосов, которые могут использоваться для организации распределенной откачки на вакуумной камере бустера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Collins I. et al.* Beam Screens for the LHC Arc Magnets. Functional Specification LHC-VSS-ES-0001 rev. 1.0
2. *Benvenuti C. et al.* // *Vacuum*. 2001. V. 60. P. 57–65.
3. *Krämer A. et al.* The Vacuum System of FAIR Accelerator Facility // *Proc. of EPAC 2006*, Edinburgh, Scotland, 2006.
4. *Krämer A.* Challenges of the FAIR Vacuum System // *3rd ASPERA Technology Forum Industry Meets Academia: Vacuum & Cryogenics*. 2012.
5. *Wilfert St., Hackler T., Wengertorh M.* Development of Cryosorption Pumps for SIS100.
6. <http://nica.jinr.ru>
7. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов нуклотрона. Препринт ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011.
8. <http://betacool.jinr.ru>
9. *Rossi A., Hilleret N.* LHC Project Report 674. 2003.
10. <http://www.saesgroup.com>
11. *Boffito et al.* Gettering in Cryogenic Applications // *J. Vac. Sci. Tech. A*. 1987. V. 5, No. 6. P. 3442; Cryogenic Vacuum System. GSI Scientific Report PHN-FAIR-16. 2012.
12. <http://agilent.com>
13. <http://www.vakuum.cz>
14. *Bazanov A. M. et al.* Ultrahigh Vacuum in Superconducting Synchrotrons // *Proc. of RuPAC2014*, Obninsk, Russia, 2014; <http://jacow.org>.