

Расчет и проектирование высоковакуумных систем циклотронного ускорителя с применением конечно-элементного моделирования

З. Г. Люллин^{1,2}, И. В. Лазарев², И. В. Гольтяев^{1,2}, Д. К. Кострин¹✉

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», Санкт-Петербург, Россия

✉ dkkostrin@mail.ru

Аннотация. При проведении исследований свойств материалов и электронных компонентов часто применяются мощные потоки ускоренных частиц, генерируемые циклотронными ускорителями. Функционирование данных комплексов, имеющих в своей конструкции сложную систему вакуумных узлов, критично зависит от поддержания в них сверхвысокого вакуума. Целью данной статьи стало моделирование методом конечных элементов и анализ распределения остаточного газа внутри вакуумной камеры циклотрона для определения недостатков системы и определения возможностей совершенствования конструкции. Откачиваемый объем имеет сложную геометрию и при моделировании необходимо учитывать не только размеры камеры, но и расположенные внутри компоненты, а также физические свойства поверхностей камеры, которые влияют на процессы диффузии и газовой выделения. Проведенное моделирование позволило выявить несколько важных аспектов, требующих дальнейшей оптимизации, в частности необходимость замены используемого трубопровода на конструкцию с большим диаметром на критическом участке системы.

Ключевые слова: циклотронный ускоритель, высокий вакуум, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, откачка, проводимость системы, вакуумный насос

Для цитирования: Расчет и проектирование высоковакуумных систем циклотронного ускорителя с применением конечно-элементного моделирования / З. Г. Люллин, И. В. Лазарев, И. В. Гольтяев, Д. К. Кострин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 16–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-16-25.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Calculation and Design of High-Vacuum Cyclotron Accelerator Systems Using Finite Element Modeling

Z. G. Lyullin^{1,2}, I. V. Lazarev², I. V. Golytaev^{1,2}, D. K. Kostrin¹✉

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Saint Petersburg, Russia

✉ dkkostrin@mail.ru

Abstract. When conducting research on the properties of materials and electronic components, powerful streams of accelerated particles generated by cyclotron accelerators are often used. The functioning of these complexes, which have a complicated system of vacuum units in their design, critically depends on maintaining an ultra-high vacuum in them. The purpose of this work was finite element modeling and analysis of the distribution of residual gas inside the vacuum chamber of the cyclotron to determine the shortcomings of the system and define the possibilities for improving the design. The pumped volume has a complex geometry and when modeling, it is necessary to take into account not only the dimensions of the chamber, but also the components located inside, as well as the physical properties of the chamber surfaces, which affect the processes of diffusion and gas release. The conducted modeling allowed to identify several important aspects that require further optimization, in particular, the need to replace the used pipeline with a structure with a large diameter in a critical section of the system.

Keywords: cyclotron accelerator, high vacuum, computer simulation, finite element method, pumping, system conductivity, vacuum pump

For citation: Calculation and Design of High-Vacuum Cyclotron Accelerator Systems Using Finite Element Modeling / Z. G. Lyullin, I. V. Lazarev, I. V. Goltyaev, D. K. Kostrin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 16–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-16-25.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Современные методы исследования свойств материалов и электронных компонентов [1] часто используют мощные потоки ускоренных частиц, генерируемых циклотронами [2], [3]. Указанные сложные ускорительные комплексы представляют собой совокупность вакуумных узлов, связанных в единую систему, функционирование которой критично зависит от поддержания в ней сверхвысокого вакуума. Рассмотрим подробнее архитектуру такой системы. Типичный ускорительный комплекс, подобный описанному в [4], может включать в себя несколько вакуумных камер, объединенных в систему трубопроводами с запорной арматурой. В качестве иллюстрации можно представить схему (рис. 1), демонстрирующую расположение основных вакуумных узлов, и схему (рис. 2), показывающую их взаимосвязь и принципы откачки (подробное описание условных обозначений вакуумных элементов приведено в [5]). Однако следует отметить, что конкретная конфигурация может в значительной мере варьироваться в зависимости от целей исследования и параметров ускорителя.

В рассматриваемом примере для достижения и поддержания необходимого вакуума используется комбинированная система откачки. Семь ос-

новных вакуумных объемов, не считая камеры самого циклотрона, откачиваются высокопроизводительными турбомолекулярными насосами, обеспечивающими высокую скорость откачки и низкое предельное давление. Отдельного внимания заслуживает камера циклотрона [6], [7], где для достижения предельно низких давлений применяются более эффективные криосорбционные насосы. Эти насосы, использующие явление адсорбции газов на охлажденных поверхностях, способны достигать значительно более низких давлений, чем турбомолекулярные. В данном случае установлены два криосорбционных насоса для обеспечения избыточной надежности и более быстрого достижения рабочего вакуума. Для предварительной откачки всех объемов перед запуском высоковакуумных насосов используется форвакуумный пост, объединенный с шестью спиральными насосами, обеспечивающими первичное удаление значительных объемов газа.

К каждому вакуумному узлу предъявляются строгие требования по степени разреженности [8]. Типичное рабочее давление не должно превышать $10^{-6} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст. Превышение этого значения приводит к существенным потерям интенсивности пучка ускоренных частиц. Остаточный газ в вакуумной системе выступает в роли газовой мишени, вызывая ионизацию и столкновения с отрицательными ионами, формирующими ускоряемый пучок [9]. Эти столкновения приводят к обдирке пучка – потере частиц, снижению их энергии и, как следствие, уменьшению тока пучка. Снижение тока пучка – критически важный параметр, влияющий на эффективность экспериментов. Малое значение силы тока означает уменьшение количества частиц, взаимодействующих с исследуемым образцом, что снижает точность и надежность получаемых результатов [10], [11].

Для поддержания чистоты вакуумной системы и предотвращения загрязнения поверхностей в ускорительном комплексе применяются исключительно безмасляные насосы [12]. Масляные пары, попадая в вакуумную систему, могут образовывать пленки на внутренних поверхностях,

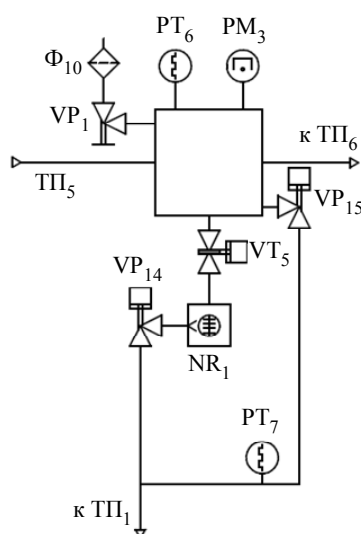


Рис. 1. Вакуумная схема одного из узлов циклотрона
Fig. 1. Vacuum circuit of one of the nodes of the cyclotron

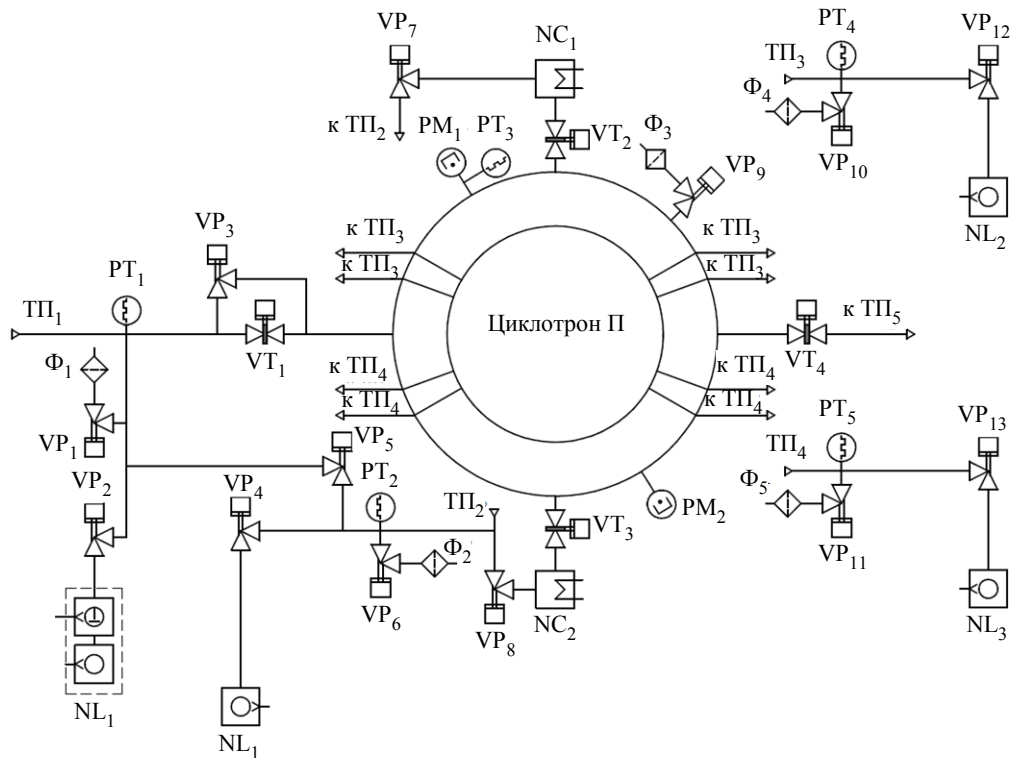


Рис. 2. Полная вакуумная схема циклотрона
Fig. 2. Full vacuum circuit of the cyclotron

что отрицательно сказывается на качестве вакуума и может вызвать непредсказуемые изменения в характеристиках ускорителя. Кроме того, масляные загрязнения могут нанести непоправимый ущерб исследуемым образцам. Вакуумная арматура выполнена электропневматической и нормально закрытой, что обеспечивает безопасность эксплуатации установки. При возникновении аварийной ситуации электропневматическая система автоматически отсекает аварийный узел от остальных, предотвращая распространение разгерметизации и защищая персонал от потенциальных опасностей. Такая архитектура критически важна для обеспечения безопасной работы сложного оборудования, функционирующего при высоком вакууме с мощными ускоренными пучками частиц. Система мониторинга вакуума, как правило, включает в себя множество датчиков давления, расположенных в стратегически важных точках системы, что позволяет оперативно выявлять и устранять утечки [13].

Вакуумная система циклотрона представляет собой сложное инженерное устройство, требующее детального анализа для обеспечения оптимальной работы ускорителя. Центральным элементом системы служит вакуумная камера циклотрона, соединенная с семью независимыми высоковакуумными узлами посредством протяженных

вакуумных линий. Каждый из этих узлов, в свою очередь, включает в себя целый ряд компонентов, критичных для достижения и поддержания необходимого уровня вакуума. К ключевым элементам каждого узла относятся:

- пневматическая запорная арматура, которая обеспечивает герметичное разделение вакуумных участков системы, позволяя проводить ремонтные работы или замену компонентов без нарушения вакуума в остальных частях системы. Выбор типа арматуры (например, мембранные или шариковые краны) определяется рабочим давлением, химической агрессивностью откачиваемых газов и требованиями к герметичности. Современные системы часто используют автоматизированные клапаны с управлением по сигналам от системы контроля;

- датчики давления, которые обеспечивают мониторинг вакуума в реальном времени. Для измерения низкого и высокого вакуума используются разные типы датчиков: ионизационные манометры (для высокого вакуума, обеспечивающие высокую точность измерений в диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-10}$ Па), термопарные датчики (для низкого вакуума и предварительной откачки), манометры Пирани (для промежуточного вакуума). Размещение датчиков в разных точках системы позволяет получить полную картину распределения давления;

– турбомолекулярный насос – основной насос для достижения высокого вакуума. Он основан на принципе передачи импульса молекулам газа вращающимися роторами. Скорость откачки турбомолекулярного насоса зависит от его размеров, скорости вращения ротора и типа откачиваемого газа. Важно отметить, что турбомолекулярные насосы требуют предварительной откачки до определенного уровня давления (форвакуум), обычно обеспечиваемого форвакуумными насосами (например, роторными или мембранными). Перед включением турбомолекулярного насоса необходима предварительная откачка до давления порядка 10^{-1} Па. Для этого используются форвакуумные насосы, которые способны откачивать значительные объемы газа при относительно высоких давлениях. Выбор типа форвакуумного насоса также зависит от требуемой скорости откачки и характеристик откачиваемого газа.

Целью данных исследований было моделирование и анализ распределения остаточного газа внутри вакуумной камеры циклотрона. Это критично для оптимизации работы ускорителя, поскольку остаточный газ может взаимодействовать с ионами, снижая эффективность ускорения и вызывая нежелательные эффекты: распыление материала электродов, загрязнение мишеней и т. п. Анализ проводился с использованием численного моделирования, основанного на уравнениях газовой динамики и учитывающего геометрию вакуумной камеры, проводимость вакуумных линий и характеристики откачивающих насосов. Моделирование позволяет определить «узкие места» в системе, где давление остаточного газа может быть выше допустимого уровня [14].

Моделирование высоковакуумной системы циклотронного ускорителя. Основное уравнение вакуумной техники $S_0 = (US)/(U + S)$, где S – скорость откачки насоса; U – проводимость вакуумной линии; S_0 – эффективная скорость откачки объекта показывает, что эффективная скорость откачки зависит как от скорости насоса, так и от проводимости вакуумных линий. Проводимость, в свою очередь, зависит от геометрии трубопровода и его шероховатости. Длинные и узкие вакуумные линии существенно ограничивают эффективную скорость откачки. Для увеличения проводимости применяют трубы большего диаметра с гладкой внутренней поверхностью, а также используют дифференциальную откачку, разделяя вакуумную систему на секции с отдельными насосами.

Оценка степени обработки поверхности вакуумной камеры – еще один важный аспект. Шероховатая поверхность может способствовать десорбции газов, ухудшая вакуум, поэтому камера циклотрона изготавливается из материалов с низким коэффициентом десорбции (например, нержавеющей стали с полировкой) и подвергается специальной обработке (например, электрополировке) для минимизации шероховатости [15]. Дополнительно для снижения парциального давления определенных газов может применяться специальная обработка поверхности камеры, например термическая обработка при высоких температурах в вакууме.

Вопрос установки дополнительных насосов для откачки камер, присоединенных к вакуумной системе, решается на основе анализа моделирования и расчетов, учитывающих объемы камер, требуемый уровень вакуума и допустимое время откачки. Дополнительные насосы могут быть необходимы для ускорения процесса откачки и уменьшения времени простоя. В целом, оптимизация вакуумной системы циклотрона – это многопараметрическая задача, требующая комплексного подхода и использования современного программного обеспечения для моделирования и анализа [16].

Для решения задачи по откачке камеры циклотрона использовались 3D-модели, которые позволили создать точное представление полого объема, требующего откачки. Этот объем представляет собой сложное геометрическое пространство, где необходимо учитывать не только размеры камеры, но и такие внутренние компоненты, как магниты и ионные источники [17]. Важно отметить, что каждая поверхность камеры имеет свои уникальные физические свойства, которые влияют на процессы диффузии и газовой выделения.

Моделирование осуществлялось в программной среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов, в основе которого лежит метод решетчатых уравнений Больцмана [18]. Сетка, использованная для расчетов, показана на рис. 3. Минимальный размер элемента сетки – 2.18 мм, а максимальный – 3.18 мм.

В процессе моделирования для каждой поверхности камеры были заданы коэффициенты диффузии, соответствующие материалам, из которых она изготовлена. Например, для стали был установлен коэффициент диффузии $3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), для алюминия – $3 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$), а для меди – $3 \cdot 10^{-12}$ мм рт. ст./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Эти значения играют ключевую роль в определении эффектив-

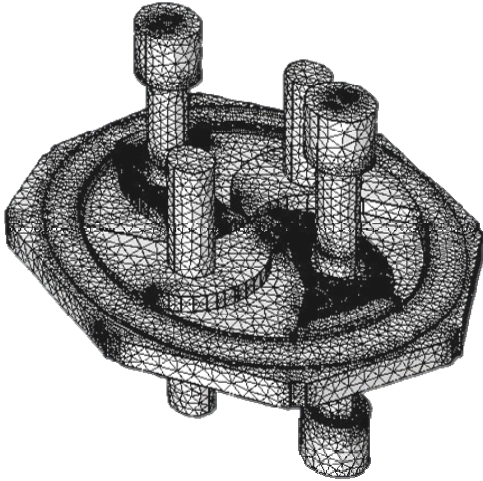


Рис. 3. Разбиение объема центральной камеры циклотрона на элементы сетки
Fig. 3. Splitting the volume of the central chamber of the cyclotron into grid elements

ности откачки, поскольку они позволяют оценить, сколько газа может выделяться с каждой поверхности в зависимости от используемого материала.

Важный аспект проектирования системы откачки представляет правильное расположение насосов.

В данном устройстве предусмотрено использование криосорбционных и турбомолекулярных насосов, которые располагаются в стратегически важных местах. Каждый из двух криогенных насосов имеет производительность 5000 л/с, что должно быть достаточным для откачки объема камеры, но необходимо проверить, не потребуется ли добавление четырех турбомолекулярных насосов с производительностью 800 л/с каждый.

К основным сложностям в процессе откачки относится наличие сужения внутри камеры, представляющего собой неотъемлемую часть резонансной системы. Из-за этого сужения эффективность откачки значительно снижается и простое увеличение числа насосов не всегда приводит к ожидаемым результатам. В этом контексте важно отметить, что в расчетах не учитывалось натекание газа с источника ионов, поскольку основная цель заключалась в оценке целесообразности установки дополнительных турбомолекулярных насосов.

На рис. 4 представлена общая схема камеры циклотрона, а также увеличенное изображение проблемной зоны, где расположено сужение.

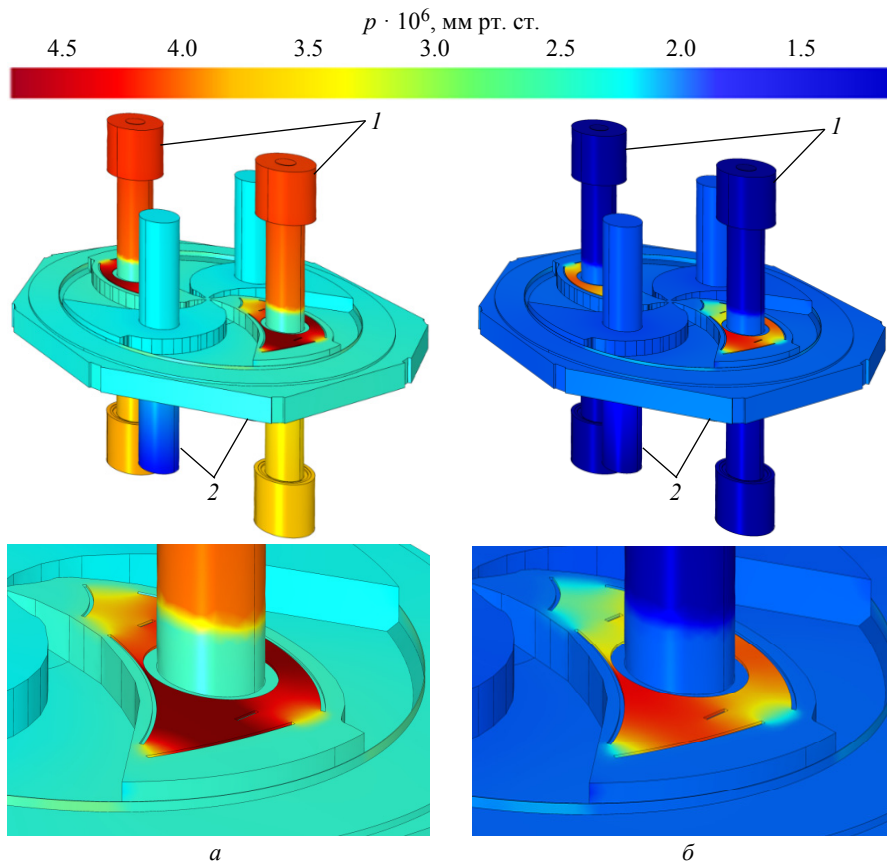


Рис. 4. Распределение давления внутри камеры циклотрона:
а – турбомолекулярные насосы выключены; б – включены;
1 – турбомолекулярные насосы; 2 – криосорбционные
Fig. 4. Pressure distribution inside the cyclotron chamber: а – turbomolecular pumps are turned off; б – on; 1 – turbomolecular pumps; 2 – cryosorption

Данная область представляет собой узкое место, через которое откачка газа затруднена. Одно из возможных решений этой проблемы – установка дополнительного маломощного насоса как можно ближе к проблемной зоне, что может помочь улучшить условия откачки.

Несмотря на предпринятые меры, после установки насосов проблемная область остается критической. В результате проведенных изменений удалось снизить верхний предел давления p с $4.6 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Этот прирост, хоть и положительный, но незначительный, что указывает на необходимость дальнейших исследований возможных улучшений в системе откачки.

Для достижения более эффективной откачки, возможно, потребуется рассмотреть альтернативные технологии или модификации существующих насосов. Например, использование насосов с более высокой производительностью или внедрение систем предварительной откачки может существенно улучшить результаты. Также стоит обратить внимание на материалы, из которых изготовлены компоненты камеры, и их влияние на процессы газовой выделенности, что может привести к оптимизации конструкции и повышению общей эффективности системы.

Проведенные расчеты подчеркивают сложность задачи, связанной с откачкой камеры циклотрона, и необходимость комплексного подхода к проектированию системы откачки, учитывающего все аспекты, включая геометрию, материалы и расположение насосов.

Другой важный вакуумный узел устройства – система транспортировки пучка частиц, представляющая собой длинные и узкие вакуумные линии. Можно оценить быстроту откачки для произвольного длинного трубопровода ($l > 20D$, где l – длина, D – диаметр) круглого сечения, который используется в установке в случае откачки воздуха из системы [19]. Тогда для трубопровода сечением 100 мм и длиной 5 м проводимость равна $U = 121D^3/l = 24.2 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Объем газа, откачиваемый насосом за единицу времени, определяется производителем оборудования. В данном случае необходимо сравнить насосы производительностью $4 \cdot 10^{-3}$ и $8 \cdot 10^{-3}$ м³/с. В первом случае $S_0 = 3.4$ л/с, а во втором быстрота откачки трубопровода возрастет почти в два раза – до 6 л/с. Такие предварительные расчеты могут облегчить процесс подбора компонентов, сразу выявив определенно недостаточные или чрезвычайно избыточные по производительности модели насосов.

Рис. 5 демонстрирует, что применение насоса с производительностью 400 л/с достаточно для откачки системы транспортировки ионов [20]. Увеличение производительности до 800 л/с приводит лишь к незначительному улучшению вакуума, что объясняется «узким местом» в системе – диаметр трубы транспортировки оказывается меньше диаметра входного патрубка насоса. Это явление называется проводимостью системы, которая определяется не только диаметром трубы, но и ее длиной, шероховатостью поверхности,

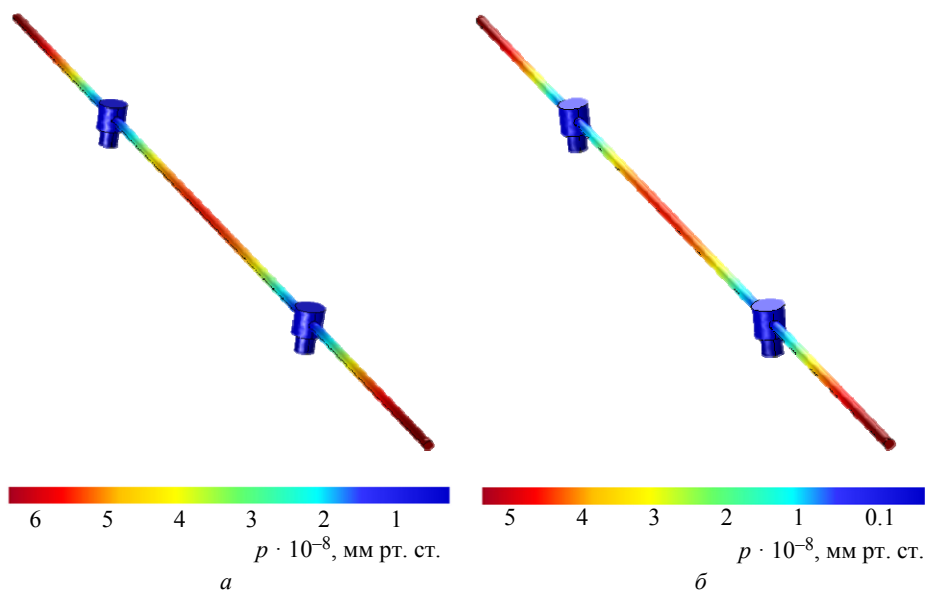


Рис. 5. Распределение давления внутри системы транспортировки при различных производительностях насоса в системе: a – 400 л/с; b – 800 л/с

Fig. 5. Pressure distribution inside the transportation system at different pump capacities in the system: a – 400 l/s; b – 800 l/s

а также геометрией соединений. В данном случае суммарная проводимость системы, включающей в себя как трубу транспортировки, так и камеру, ограничивает эффективность более мощного насоса. Таким образом, выбор насоса с производительностью 400 л/с оптимален с точки зрения соотношения цены и эффективности. Более мощный насос не принесет значительного повышения вакуума, а его стоимость и энергопотребление окажутся неоправданными.

Более детальный анализ, результаты которого приведены на рис. 6, позволил выявить пространственное распределение давления в системе. Если рассматривать зависимость давления от расстояния до насоса вдоль вертикальной оси, то, как и ожидалось, давление монотонно уменьшается по мере удаления от насоса. Это объясняется снижением проводимости трубопровода из-за возрастающего сопротивления потоку молекул газа на более протяженных участках. Минимальное давление, естественно, достигается непосредственно на входе в насос, где скорость откачки максимальна. Важно отметить, что изменение давления нелинейно. На начальном участке давление падает более резко, затем скорость его падения замедляется, приближаясь к асимптоте, определяемой остаточным давлением, создаваемым другими источниками в системе, например десорбцией с поверхности стенок.

Внутри вакуумной камеры наблюдается относительно равномерное давление. Это обусловлено увеличением эффективной площади сечения камеры по сравнению с диаметром трубопровода. Более высокая проводимость камеры обеспечивает быстрое выравнивание давления. Максимальное давление, как и следовало ожидать, наблюда-

ется в непосредственной близости от источника газа (предполагается, что источник газа расположен в центре камеры или в ее части, ближней к трубопроводу транспортировки). В данном случае это распределение давления благоприятно сказывается на работе устройства, так как минимизирует градиенты давления, которые могут влиять на траекторию ионов.

Можно отметить, что проводимость сложных вакуумных систем, состоящих из отдельных элементов, определяется аналогично сопротивлению электрических цепей: при последовательном соединении n элементов вакуумной системы с известной проводимостью U_i (сопротивлением Z_i) проводимость системы определяется по формуле $U^{-1} = \sum_{i=1}^n U_i^{-1}$. Видно, что общая проводимость системы всегда меньше, чем проводимость любого из ее элементов.

Закключение. Моделирование позволило выявить несколько важных аспектов, требующих дальнейшей оптимизации. Например, анализ проводимости системы показал возможность роста эффективности откачки при увеличении диаметра трубы на критическом участке. Также следует изучить возможность оптимизации геометрии камеры, например изменяя ее форму или добавляя дополнительные отводы для улучшения распределения потока газа. Более того, анализ материалов стенок камеры и трубы может выявить источники десорбции, что позволит снизить остаточное давление и улучшить вакуум в системе. Все эти усовершенствования необходимы для достижения более высокой плотности тока пучка

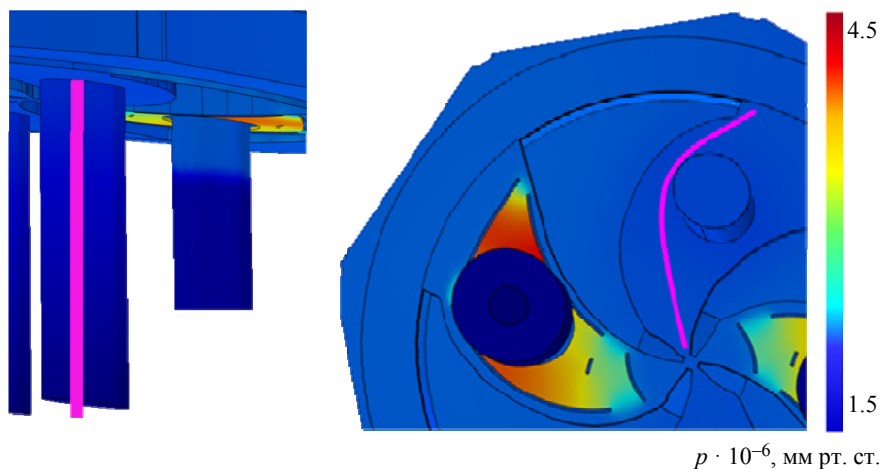


Рис. 6. Распределение давления внутри камеры циклотрона с криосорбционными насосами

Fig. 6. Pressure distribution inside the cyclotron chamber with cryosorption pumps

ионов в циклотроне, что напрямую влияет на эффективность работы ускорителя. В целом, тщательное изучение полученных результатов и их корреляция с геометрическими параметрами вакуумной системы позволят оптимизировать ее кон-

струкцию и добиться наилучших параметров работы циклотрона. Дополнительные исследования могут включать в себя экспериментальную верификацию моделирования, используя различные типы датчиков давления и методики измерения.

Список литературы

1. Махутов Н. А. Развитие технической диагностики в академических и отраслевых лабораториях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89, № 10. С. 52–54. doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-10-52-54.
2. Использование 120-см циклотрона для исследования комбинированного воздействия ионизирующего излучения и гипомангнитных условий на семена салата / В. М. Лебедев, Н. Г. Платова, А. В. Спаский, К. А. Труханов // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80, № 3. С. 378–381. doi: 10.31857/S0367676520040171.
3. Исследование материалов ТЯР в потоке дейтериевой плазмы: радиационные повреждения, модификация поверхности, эрозия / Б. И. Хрипунов, В. С. Койдан, А. И. Рязанов, В. М. Гуреев, С. Т. Латушкин, Е. В. Семенов, В. Г. Столярова // Вопр. атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43, № 1. С. 46–54. doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-46-54.
4. Система выпуска пучка многозарядных ионов из циклотрона / Ю. Н. Гавриш, А. В. Галчук, Д. В. Кирцев, Ю. К. Осина, Ю. И. Стогов // Журн. техн. физики. 2023. Т. 93, № 2. С. 298–304. doi: 10.21883/JTF.2023.02.54507.217-22.
5. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. М.: Высш. шк., 2007. 391 с.
6. Центральная область циклотрона Ц-250 / И. В. Горбунов, А. В. Галчук, С. В. Григоренко, Ю. К. Осина, С. С. Цыганков // Сибирский физ. журн. 2024. Т. 19, № 2. С. 50–56. doi: 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56.
7. Смирнов В. Л. Проектирование центральной зоны компактного циклотрона // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2019. Т. 16, № 1. С. 40–45.
8. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Андросов А. В. Методы расчета вакуумных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 220 с.
9. Recent negative ion source activity at JYFL / T. Kalvas, O. Tarvainen, J. Komppula, M. Laitinen, T. Sajavaara, H. Koivisto, A. Jokinen, M. P. Dehnel // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1515. P. 349–358. doi: 10.1063/1.4792803.
10. Cleaning of the dielectric surfaces using a controlled gas-discharge source of fast neutral particles / A. S. Fadeev, A. S. Talanov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov, A. A. Lisenkov, V. D. Goncharov // J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 872, no. 1. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012021.
11. Simon V. A., Kostrin D. K., Trifonov S. A. Development of a source of accelerated neutral particles for the final purification of dielectric substrates // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2356, no. 1. P. 020021. doi: 10.1063/5.0052918.
12. Повышение эффективности рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса / А. В. Тюрин, А. В. Бурмистров, С. И. Саликеев, А. А. Райков // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2021. № 3. С. 122–134. doi: 10.18698/0236-3941-2021-3-122-134.
13. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 226 с.
14. Смирнов В. Л. Циклотрон и его моделирование // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2021. Т. 52, № 5. С. 1158–1304.
15. Исследование ключевых факторов для минимизации шероховатости химических покрытий сплавами Ni-P и Ni-Cu-P / Е. Г. Винокуров, Ч. Р. Гайнетдинов, Р. В. Графушин, В. Д. Скопинцев, В. В. Васильев, Т. Ф. Бурухина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 2. С. 29–38. doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-2-29-38.
16. Computer design of a compact cyclotron / B. Wang, H. Hao, S. B. Vorozhtsov, V. L. Smirnov, Q. Yao, J. Zhang, M. Song, H. Zhao // Phys. of Particles and Nuclei Lett. 2012. Vol. 9, № 3. P. 288–298. doi: 10.1134/S1547477112030053.
17. Моделирование мультикасповой магнитной системы источника ускоренных нейтральных частиц / С. А. Трифонов, К. С. Воробьев, Д. К. Кострин, С. А. Марцынчиков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 5. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-5-14.
18. О реализации конечно-элементного моделирования в задачах остеосинтеза на кластерных системах / Д. К. Андрейченко, П. В. Ирматов, М. С. Ирматова, М. Г. Щербаков // Изв. Сар. ун-та. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2010. Т. 10, № 3. С. 77–85. doi: 10.18500/1816-9791-2010-10-3-77-85.
19. Вакуумная техника / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов, Н. К. Никулин, И. В. Автономова и др.; под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
20. Динамика пучка в модернизированном циклотроне Ц-80 и системе транспортировки / Ю. К. Осина, А. В. Галчук, И. В. Горбунов, А. Н. Леушина // Письма в журн. «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2024. Т. 21, № 3(254). С. 474–479.

Информация об авторах

Люллин Захар Геннадьевич – аспирант гр. 2922 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.
E-mail: lullin@luts.niiefa.spb.su

Лазарев Игорь Витальевич – инженер-исследователь. АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.

E-mail: lazarev@luts.niiefa.spb.su

Гольтяев Иван Витальевич – аспирант гр. 3928 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер-исследователь, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия

E-mail: goltyaev@luts.niiefa.spb.su

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Вклад авторов:

Люллин З. Г. – обзор литературы, подготовка текста статьи.

Лазарев И. В. – разработка модели устройства, проведение экспериментов.

Гольтяев И. В. – разработка методики измерения, проведение экспериментов.

Кострин Д. К. – постановка задачи, общее руководство, выводы.

References

1. Mahutov N. A. Razvitie tehnicheckoj diagnostiki v akademicheskikh i otraslevykh laboratorijah // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2023. T. 89, № 10. S. 52–54. doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-10-52-54. (In Russ.).
2. Ispol'zovanie 120-sm ciklotrona dlja issledovanija kombinirovannogo vozdeystvija ionizirujushhego izlučeniya i gipomagnitnyh uslovij na semena salata / V. M. Lebedev, N. G. Platova, A. V. Spasskij, K. A. Truhanov // Izv. RAN. Ser. fizicheskaja. 2016. T. 80, № 3. S. 378–381. doi: 10.31857/S0367676520040171. (In Russ.).
3. Issledovanie materialov TJaR v potoke dejtteriovoj plazmy: radiacionnye povrezhdenija, modifikacija poverhnosti, jerozija / B. I. Hripunov, V. S. Kojdan, A. I. Rjazanov, V. M. Gu-reev, S. T. Latushkin, E. V. Semenov, V. G. Stoljarova // Vopr. atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Termojadernyj sintez. 2020. T. 43, № 1. S. 46–54. doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-46-54. (In Russ.).
4. Sistema vypuska puchka mnogozarjadnyh ionov iz ciklotrona / Ju. N. Gavriš, A. V. Galchuk, D. V. Kircev, Ju. K. Osina, Ju. I. Stogov // Zhurn. tehn. fiziki. 2023. T. 93, № 2. S. 298–304. doi: 10.21883/JTF.2023.02.54507.217-22. (In Russ.).
5. Rozanov L. N. Vakuumnaja tehnika. M.: Vyssh. shk., 2007. 391 s. (In Russ.).
6. Central'naja oblast' ciklotrona C-250 / I. V. Gorbunov, A. V. Galchuk, S. V. Grigorenko, Ju. K. Osina, S. S. Cygankov // Sibirskij fiz. zhurn. 2024. T. 19, № 2. S. 50–56. doi: 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56. (In Russ.).
7. Smirnov V. L. Proektirovanie central'noj zony kompaktnogo ciklotrona // Pis'ma v zhurn. «Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra». 2019. T. 16, № 1. S. 40–45. (In Russ.).
8. Nesterov S. B., Vasil'ev Ju. K., Androsov A. V. Metody rasčeta vakuumnyh sistem. M.: Izd-vo MJel, 2004. 220 s. (In Russ.).
9. Recent negative ion source activity at JYFL / T. Kalvas, O. Tarvainen, J. Komppula, M. Laitinen, T. Sajavaara, H. Koivisto, A. Jokinen, M. P. Dehnel // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1515. P. 349–358. doi: 10.1063/1.4792803.
10. Cleaning of the dielectric surfaces using a controlled gas-discharge source of fast neutral particles / A. S. Fadeev, A. S. Talanov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov, A. A. Lisenkov, V. D. Goncharov // J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 872, no. 1. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012021.
11. Simon V. A., Kostrin D. K., Trifonov S. A. Development of a source of accelerated neutral particles for the final purification of dielectric substrates // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2356, no. 1. P. 020021. doi: 10.1063/5.0052918.
12. Povyšenie jeffektivnosti rabočego processa bezmasljanogo spiral'nogo vakuumnogo nasosa / A. V. Tjurin, A. V. Burmistrov, S. I. Salikeev, A. A. Rajkov // Vestn. MG TU im. N. Je. Bauman. Ser. Mashinostroenie. 2021. № 3. S. 122–134. doi: 10.18698/0236-3941-2021-3-122-134. (In Russ.).
13. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Jelektronnye sredstva kontrolja tehnologičeskikh processov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LjeTI», 2016. 226 c. (In Russ.).
14. Smirnov V. L. Ciklotron i ego modelirovanie // Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra. 2021. T. 52, № 5. S. 1158–1304. (In Russ.).
15. Issledovanie ključevykh faktorov dlja minimizacii sherohovatosti himičeskikh pokrytij splavami Ni-P i Ni-Cu-P / E. G. Vinokurov, Ch. R. Gajnetdinov, R. V. Grafushin, V. D. Skopincev, V. V. Vasil'ev, T. F. Buruhina // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2024. T. 90, № 2. S. 29–38. doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-2-29-38. (In Russ.).
16. Computer design of a compact cyclotron / B. Wang, H. Hao, S. B. Vorozhtsov, V. L. Smirnov, Q. Yao, J. Zhang, M. Song, H. Zhao // Phys. of Particles and Nuclei Lett. 2012. Vol. 9, № 3. P. 288–298. doi: 10.1134/S1547477112030053.

17. Modelirovanie mul'tikaspojv magnitnoj sistemy istochnika uskorenyh nejtral'nyh chastic / S. A. Trifonov, K. S. Vorob'ev, D. K. Kostrin, S. A. Marcynjukov // Izv. SPbGjeTU «LjeTI». 2024. T. 17, № 5. S. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-5-14. (In Russ.).

18. O realizacii konečno-jelementnogo modelirovanija v zadachah osteosinteza na klasternyh sistemah / D. K. Andrejchenko, P. V. Irmatov, M. S. Irmatova, M. G. Shherbakov // Izv. Sar. un-ta. Ser.: Matematika. Mehanika. Informatika. 2010. T. 10, № 3. S. 77–85. doi: 10.18500/1816-9791-2010-10-3-77-85. (In Russ.).

19. Vakuumnaja tehnika / K. E. Demihov, Ju. V. Panfilov, N. K. Nikulin, I. V. Avtonomova i dr.; pod obshh. red. K. E. Demihova, Ju. V. Panfilova. 3-e izd. M.: Mashinostroenie, 2009. 590 s. (In Russ.).

20. Dinamika puchka v modernizirovannom ciklotrone C-80 i sisteme transportirovki / Ju. K. Osina, A. V. Galchuk, I. V. Gorbunov, A. N. Leuhina // Pis'ma v zhurn. «Fizika jelementarnyh chastic i atomnogo jadra». 2024. T. 21, № 3(254). S. 474–479. (In Russ.).

Information about the authors

Zakhar G. Lyullin – postgraduate student of gr. 2922, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: lullin@luts.niiefa.spb.su

Igor V. Lazarev – engineer-researcher, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: lazarev@luts.niiefa.spb.su

Ivan V. Goltyaev – postgraduate student of gr. 3928, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer-researcher, JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.

E-mail: goltyaev@luts.niiefa.spb.su

Dmitry K. Kostrin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Author contribution statement:

Lyullin Z. G. – literature review, preparation of the article text.

Lazarev I. V. – development of a device model, conducting experiments.

Goltyaev I. V. – development of measurement methods, conducting experiments.

Kostrin D. K. – problem statement, general guidance, conclusions.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; принята к публикации после рецензирования 03.02.2025; опубликована онлайн 25.04.2025.

Submitted 21.01.2025; accepted 03.02.2025; published online 25.04.2025.