

## ОТЗЫВ

официального оппонента

**Щербы Виктора Евгеньевича, доктора технических наук, профессора на диссертацию Семенова Алексея Михайловича «Разработка, исследование и запуск вакуумной системы бустера-синхротрона для источника синхротронного излучения третьего поколения NSLS-II», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.**

**Актуальность работы.** В настоящее время во многих отраслях науки и техники широко используется вакуум. В физике пучков заряженных частиц и ускорительной технике создание исследовательских установок без применения вакуумной техники невозможно. В настоящее время в мире работают и строятся источники синхротронного излучения третьего поколения, к которым можно отнести установку NSLS-II, построенную в Брукхейвенской Национальной лаборатории США. Данная установка состоит из линейного ускорителя электронов на 200 МэВ, синхротрона на энергию инжекции до 3 ГэВ, основного накопительного кольца и исследовательских станций синхротронного излучения. В синхротроне-бустере накопленный ток пучка до 20 мА, что является рекордным значением для установок данного типа. Вследствие этого, работу, направленную на исследование и запуск вакуумной системы бустера-синхротрона, безусловно, можно считать актуальной и своевременной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 38 наименований. Диссертация изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 10 таблиц.

**Во введении.** Во введении автор отмечает, что одной из наиболее важных систем любого ускорительного комплекса является вакуумная система, которая позволяет обеспечить бесперебойную работу

ускорительной установки и проектируется с учетом ряда «жестких требований». Автор отмечает, что получение вакуума требуемого уровня напрямую определяет время жизни пучка, материал вакуумных камер влияет не только на газовыделение со стенок, но может служить источником возмущения магнитного поля ускорителя за счет индуцируемых токов Фуко, для обеспечения контроля общего и парциального давлений остаточных газов, необходимо правильно распределить датчики давления масс-спектрометры по объему вакуумной системы. Кроме того, немаловажно обеспечить, как отмечает автор, требуемую быстроту откачки системы, что обеспечивается необходимой быстротой откачки вакуумных насосов и достаточной проводимостью вакуумных камер.

**Первая глава** диссертации посвящена определению расчетных параметров вакуумной системы бустера NSLS-II. Проведен сравнительный анализ современных существующих бустерных синхротронов и даны параметры бустера при работе его в режиме 1 Гц и 2 Гц. Рассмотрено время жизни пучка, сечение упругого и неупругого значения на остаточном газе и показано, что для обеспечения «вакуумного» времени жизни пучка около 10 сек. парциальное давление не должно превышать  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр для водорода и  $10^{-7}$  Торр для СО. Проведены расчеты по определению времени нарастания ионной неустойчивости, которые показывают, что при давлении  $10^{-7}$  Торр нарастание неустойчивости составляет 23 мс при энергии инжекции и 350 мс при энергии экстракции, а при давлении  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр – 117 мс при энергии инжекции и 1750 мс при энергии экстракции. При первичной проводке пучка в одногустковом режиме более предпочтительно давление  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр, которое обеспечивает время нарастания неустойчивости близкое к времени затухания. В третьем параграфе выполнен расчет основных параметров синхротронного излучения, который необходим в дальнейшем для расчета вакуумной системы. Здесь же рассмотрен механизм образования фотонно-стимулированной десорбции. Определено, что коэффициент фотонно-стимулированной десорбции должен быть не выше  $2 \cdot 10^{-5}$  молекул на фотон

для достижения вакуума  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр. Принимая во внимание, что в настоящее время для достижения высокого вакуума активно используется хемосорбция газов, рассмотрен вариант получения высокого вакуума на основе нераспыляемых геттеров. В результате проведенных исследований автором делается вывод, что применение нераспыляемых геттеров в бустерном-синхротроне NSLS-II может обеспечить необходимый вакуум. Однако, вследствие того, что при использовании геттеров необходимо увеличивать зазор в магнитах для размещения нагревателей и теплоизоляции, а также, учитывая достаточно «мягкие» требования к уровню вакуума в бустере, их применение нецелесообразно. Вместо них автор предлагает использовать современные магнитно-разрядные насосы, которые существенно дешевле и проще.

В пятом параграфе второй главы проводится расчет профиля давления, вызванного термо-/фотонно-стимулированной десорбции. Из решения уравнения диффузии показано, что распределение давления вдоль камеры между насосами, будет параболическим. Проведена оценка среднего превышения динамического давления над давлением на входе насосов и определено, что для достижения вакуума не хуже  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр, необходимо накопить интеграл тока порядка  $1,43 \text{ А} \cdot \text{час}$ , что соответствует накопленной дозе фотонов  $10^{23}$  фотон/м.

К замечаниям по первой главе можно отнести следующие:

1. Текст диссертации, в отличие от автореферата, написан «тяжелым» языком и трудночитаемый, вследствие того, что отсутствуют четко обозначенные цели и логические переходы.
2. Автор весьма вольно обращается с представленными формулами. Зачастую, отсутствуют ссылки на источники заимствований этих формул, вследствие чего становится непонятным: эта формула получена автором либо заимствована.

**Вторая глава** посвящена проектированию вакуумной системы бустера. В первом параграфе представлена общая схема бустера, с обозначением



основных элементов, входящих в бустер. Представлено распределение давлений на 16-ти метровом участке поворотной секции в случае различных расположений насосов и быстроты откачки. Увеличение расстояние между насосами в два раза, при скорости откачки 45л/с, влечет за собой ухудшение вакуума в 3 раза. При увеличении скорости откачки до 100л/с, при таком же расположении откачных насосов, динамическое давление улучшится на 5-7%. В качестве оптимального результата, автор предлагает использовать насосы с скоростью откачки 45л/с, расположенных через 2-3 метра. Вследствие импульсного режима работы магнитов предлагается использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например, нержавеющие марки стали аустенитного класса. Во втором параграфе рассмотрена конструкция вакуумной камеры дипольных магнитов и проведены расчеты по неравномерности нагрева стенок вакуумной камеры, вызванного синхронным излучением; расчеты по механической прочности вакуумной камеры и проведена оценка влияний токов Фуко. В третьем параграфе рассмотрены основные требования по проектированию вакуумных камер импульсных магнитов, включающие: BUMР магнит, кикеры впуска/выпуска, камеры впускного и выпускного септумов.

К недостаткам второй главы следует отнести:

1. Непонятно, каким образом проводились прочностные расчеты механической прочности вакуумной камеры. Какие использовались уравнения и пакеты прикладных программ для проведения расчетов.
2. Не указаны конкретные приборы для проведения экспериментальных исследований. Например, в таблице 2.2.1 отсутствует марка масс-анализатора, не указаны классы точности используемых приборов. Использование штангенциркуля для измерения изгиба свободного конца вакуумной камеры, при проведении таких исследований, представляется малоцелесообразным.

**Третья глава** посвящена вакуумным испытаниям и методике измерения коэффициента термического газовыделения. Разработана установка для

прогрева и измерений и приводится ее принципиальная схема. Вакуумные камеры для бустера NSLS-II перед проведением измерений подвергались прогреву до температуры 250-300<sup>0</sup>С в течение 24 часов под вакуумом, при одновременном прогреве откачных портов, датчиков давления и масс спектрометра. В результате проведенных экспериментов установлено, что коэффициент термического газовыделения уменьшается со временем практически линейно и достигает через 4 дня (для непрогретой повторно камеры) величины порядка 10<sup>-11</sup>л·Торр/с/см<sup>2</sup>, при этом форма камеры не имела значения. По третьей главе можно сделать следующие замечания:

1. На рис.3.2 представлены 4 измеряемые величины в функции от времени. Однако, по оси ординат отложена только одна измеряемая величина, в частности температура.
2. Температура на стр.87 записана в Цельсиях, хотя величиной Т температура обычно измеряется в Кельвинах.

**Четвертая глава** посвящена автоматизации вакуумной системы бустера и состоит из одного описательного параграфа. На мой взгляд, нецелесообразно было выносить эту информацию в качестве отдельной главы.

**В главе пятой** рассматривается запуск бустера, который был выполнен в кратчайшие сроки, как утверждает автор, менее трех месяцев. В этой главе приведены результаты сравнения расчетов давления и экспериментальных данных по измерению давления.

В качестве замечаний можно отметить, что в результате проведенного сравнения результатов расчетов и экспериментальных данных по измерению давления автором не делается никаких выводов, хотя по представленным результатам очевидно, что расчеты с экспериментом по измерению давления без пучка не совпадают на два порядка, а с пучком весьма близки и расхождение составляет менее порядка. Автор не объясняет вследствие чего получены такие расхождения.

В конце диссертации приводятся заключение и литература. В качестве замечаний по ним следует отметить в п.3 заключения указывается, что

представлена оптимальная конструкция камер, хотя оптимизация этой конструкции, на мой взгляд, не была проведена, не была сформулирована ни целевая функция, ни система накладываемых ограничений. По литературе основным замечанием является отсутствие страниц в цитируемых источниках.

**Научной новизной** в работе, несомненно, следует признать разработку вакуумной системы и вычисление профиля давлений остаточных газов, с учетом термической и фотонно-стимулированной десорбции бустерного синхротрона с высоким средним током пучка (до 20мА) и энергией 3ГэВ. Проведение экспериментов по влиянию синхротронного излучения на искажение геометрии и распределения механических напряжений в тонкостенных протяженных вакуумных камерах. Определение оптимально допустимой величины вакуумных камер, дипольных магнитов и перепускных элементов бустера.

**К практической ценности** работы, несомненно, можно отнести то, что проведенные автором исследования легли в основу проектирования вакуумной системы бустера NSLS-II, который успешно работает с 2013 года по настоящее время.

Все научные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, **обоснованы и достоверны**, что подтверждается результатами экспериментальных исследований и успешной работой бустера в течение двух лет.

**Апробация работы.** Следует отметить, что диссертация прошла достаточную апробацию, ее основные положения и результаты докладывались на научных конференциях по ускорителям заряженных частиц и по вакуумной технике, а также на семинарах в Институте ядерной физике им. Г.И.Будкера СО РАН.

**Заключение.** В целом, указанные замечания, изложенные по главам, не снижает научной значимости работы. Автореферат отражает содержание диссертации и написан четким, ясным языком.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, имеет научную и практическую значимость и по своему содержанию соответствует специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

В диссертации содержится решение задачи получения вакуума в бустере NSLS-II, имеющий существенное значение для развития вакуумной техники, что соответствует п.9 «Положения о присуждении ученых степеней».

Считаю, что диссертация Семенова Алексея Михайловича удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Официальный оппонент д.т.н., профессор,  
Заслуженный работник Высшей школы РФ,  
зав. кафедрой «Гидромеханика и  
транспортные машины»  
ФГБОУ ВПО «Омского  
государственного технического университета»

Щерба В.Е.

644050, г.Омск, пр-т Мира, 11,

ОмГТУ, кафедра «Гидромеханика и транспортные машины»,

8(3812) 65-31-77

scherba\_v\_e@list.ru

