**О допусках на интенсивность с точки зрения микроволновой продольной нестабильности при скачке критической энергии для прямоугольно сгустка в барьерном ВЧ.**

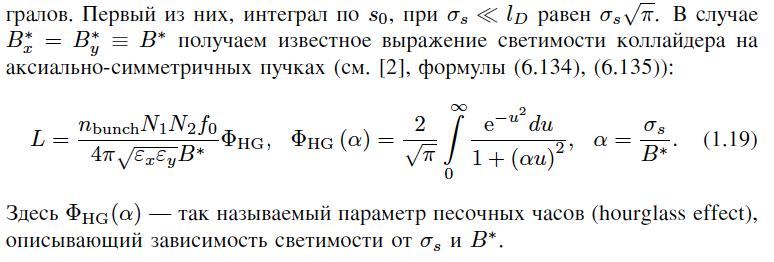
Колокольчиков С.Д.

**Введение**

Рассматривается случай инжекции протонов в коллайдер NICA из Nuclotron на энергии 2-3 ГэВ до критической энергии. Накопление и охлаждение в барьерном ВЧ до требуемого эмиттанса, необходимого для коллайдерного эксперимента на 12,6 ГэВ. Перевод пучка в барьерном ВЧ через критическую энергию. Фазовая гимнастика, распускание и группировка пучка из барьерного ВЧ-1 в ВЧ-3 (гармоническое число 66) для формирования 22 сгустков для эксперимента.

Будет рассмотрена оценка допуска на количество частиц в сгустке с точки зрения продольной микроволновой неустойчивости. Отчёт, посвященный этой проблеме «Исследование устойчивости интенсивных протонных пучков, в коллайдере NICA» [1] был выполнен П.Р. Зенкевичем в 2019 году для с опорой на работу «K. Y.  Ng, Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities, Fermilab-FN-0713, Long Beach, CA, 2002» [2], и содержит выводы, которые также обсуждаются в данной заметке. Также тут будет рассмотрена продольная динамика вблизи критической энергии в барьерном ВЧ. Cкачок критической энергии, величина и скорость приведены в работе «Формирование поляризованных протонных пучков в ускорительных комплексе NICA» [3]. Вопрос светимости коллайдерного эксперимента обсуждается в работе И.В. Мешковым в 2019 году «Светимость ионного коллайдера» [4].

**Светимость**

 Сначала необходимо определить требуемую интенсивность и длину синусоидальных сгустков в продольной плоскости для коллайдерного эксперимента. Оба эти параметра оказывают влияние на светимость. Ниже приведена формула для симметричного сгустка, однако она отражает суть и зависимость от параметров пучка.

Светимость явно зависит от продольной длины пучка только в параметре песочных часов. , , то есть при неизменных параметрах и увеличении только длины сгустка в 2 раза, влияние эффекта песочных часов уменьшит исходную светимость на 30% . Для NICA предполагается достичь , бета-функция в точке встречи .

Однако, таким образом учтена только явная зависимость от продольной длины. Неявно, светимость зависит и от продольного эмиттанса сгустка так как накладывает ограничение на количество частицы сгустке. При этом длина и разброс по импульсам для синусоидального сгустка связаны. Поэтому, любое увеличение конечного эмиттанса сгустка, приводит к увеличению его длины.

Рассмотрим эволюцию эмиттанса в процессе ускорения. Для этого нужно рассмотреть нормализованный эмиттанс как инвариант. Конечный с.к. эмиттанс синусоидального сгустка равен , что соответствует нормализованному (). Формируется из эмиттанса равномерного сгустка в барьерном ВЧ , разделенного на 22 синусоидальных сгустка при помощи ВЧ гимнастики. Эмиттанс барьерного ВЧ подвержен влиянию критической энергии на эмиттанс охлажденного пучка после инжекции , . Охлажденный пучок формируется после инжекции, накопления и электронного охлаждения на 2-3 ГэВ . Только охлаждение уменьшает эмиттанс , остальные эффекты, только раздувают эмиттанс , . Для гимнастики было принято , влияние будет обсуждено далее подробно. Основным требованием должно быть – добиться . Тогда движение вблизи критической энергии не будет раздувать эмиттанс.

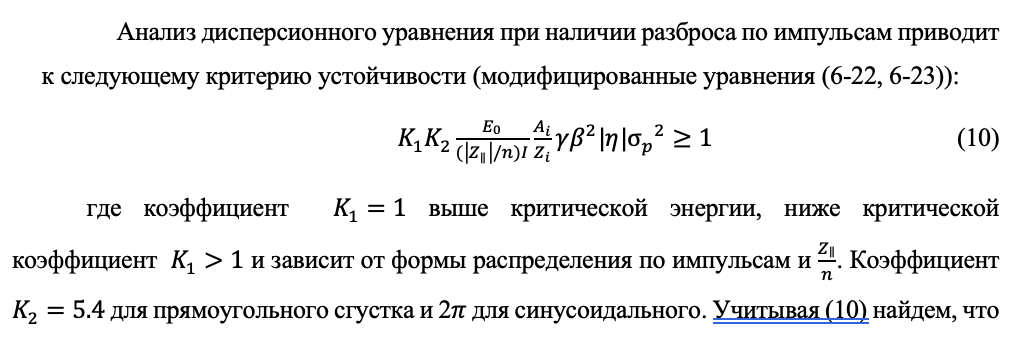
**Скачок критической энергии**

Метод скачка критической энергии применяется для сохранения фазового объема при переходе через критическую энергию. В NICA рассматривается скачок критической энергии за счёт сдвига бетатронных частот. Параметры самого скачка для NICA могут быть определены при рассмотрении магнитооптической структуры и возможностью быстрого изменения тока в квадрупольных линзах в поворотных арках. Более детально особенности скачка обсуждены в отдельной заметке «Заметка по скачку критической энергии скачком в гармоническом ВЧ в NICA». Главным остается то, что 1) возможная величина скачка ограничена ; 2) как и темп изменения критической энергии . Ограничение на величину скачка приводит к ограничению на скачок коэффициента проскальзывания , если быть более формальным, то .

Для барьерного ВЧ темп ускорения крайне мал по сравнению с гармоническими ВЧ, где для ВЧ-2 или для ВЧ-3. Таким образом, барьерное ВЧ подразумевает относительно долгое удержание пучка в окрестности около нулевого значения , а учитывая импульсный разброс частиц и зависимость от , влияние второго порядка может оказывать значительное на динамику в сепаратрисе и искажению эмиттанса. Это вопрос при численном моделировании будет рассмотрен.

**Продольная микроволновая неустойчивость**

Ограничение на порог микроволновой неустойчивости зависит от многих параметров и для равномерного распределения, характерного именно барьерному ВЧ определяется критерием Кейл-Шнель. В модифицированном виде этот критерий приведен в [1].

****

Ток тут – длина пучка или для барьерного ВЧ это эквивалентно расстоянию между удерживающими барьерами (приближено, без учётов краевых эффектов). Отсюда видно, что возникает ограничение на количество частиц ( для протонов)

или, если учесть, что нормализованный эмиттанс для барьерного ВЧ ( так как распределение по импульсам имеет гауссов вид, а продольный размер – равномерный), то справедливо для барьерного ВЧ

Таким образом при нахождении вблизи малого значения количество частиц, ограничено длиной сгустка в барьерном ВЧ. При этом нормализованный эмиттанс определяется из необходимости иметь достаточную светимость . А длина сгустка может быть варьирована движением барьеров.

Требуемое количество частиц для достижения светимости порядка – в синусоидальном сгустке, таким образом требуемое количество частиц в барьерном ВЧ как минимум должно быть больше . Для упомянутого скачка, рассматривается движение на энергии , вблизи для расчётов принято .

Эта зависимость представлена на Рис.1. Таким образом ограничение для длины пучка ограничение на количество частиц , для , .

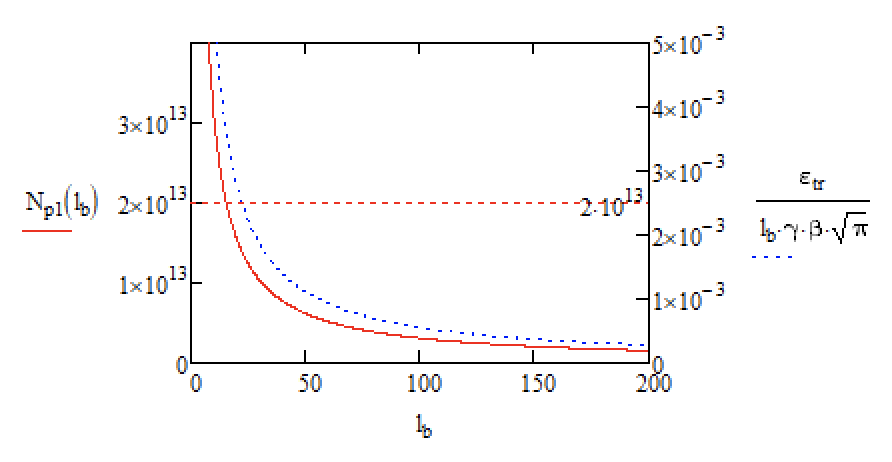
 Исходя из этих оценок, достичь конечного числа частиц для 22 сгустков представляется трудной задачей, вследствие возникновения продольной микроволновой неустойчивости вблизи критической энергии для равномерного сгустка в барьерном ВЧ.

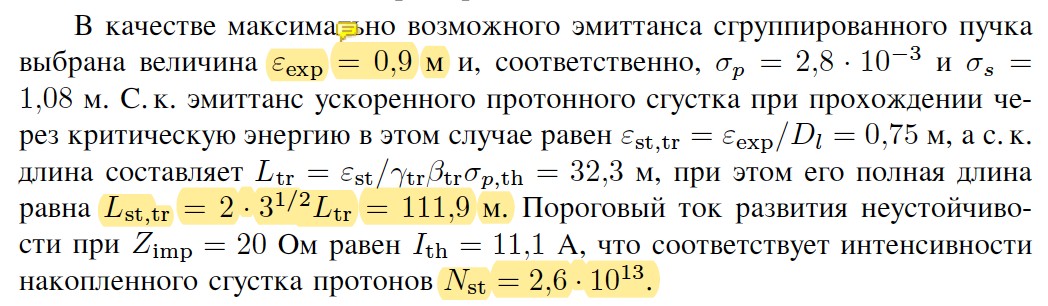
Рис. Зависимость порогового (с точки зрения продольной неустойчивости) числа частиц и порогового значения разброса по импульсам в случае барьерного ВЧ от длины сгустка или расстояния между удерживающими барьерами.

**Динамика вблизи критической энергии**

Также ранее была рассмотренная схема скачка (Рис.2) применена для численного моделирования вблизи критической энергии (Рис.3). Как уже было упомянуто, начинает быть сравнимо с (Рис. 4). Таким образом, при скачке в барьерном ВЧ происходит искажение фазовой плоскости, однако искажение энергетического распределения при этом не происходит (Рис. 5). Был рассмотрен самый ‘тяжелый’ случай, при котором пучок максимальное время удерживается при . Схема скачка может быть адаптирована таким образом, чтобы повышать критическую энергию предварительно и постепенно до момента скачка. Аналогично делать и симметрично. Момент скачка (Рис.6) сдвигает пучок относительно своего изначального положения, однако за время скачка 10 мс, незначительно.

**Заключение**

В первую очередь коллайдерные эксперименты предъявляют требования к светимости. Которые дают ограничения, помимо прочего, и на продольный фазовый размер конченого сгустка. При ускорении в барьерном ВЧ, необходимо как преодолеть критическую энергию, так и разделить пучок на 22 сгустка при помощи ВЧ гимнастики и при этом не раздуть фазовый объём. Рассмотрена возможная схема скачка критической энергии, которая даёт ограничение на величину скачка и как следствие – пороговое значение количества частиц вследствие микроволновой неустойчивости. Таким образом, необходимо существенное сжатие барьеров для сохранения требуемого конечного эмиттанса.

 Однако, в работе [3] полученные оценки удовлетворительны. Длина пучка в ВЧ барьере тут принята равной не длине зазора между ВЧ барьерами, а , где . Более того, в таком опеределении отсутвствет

Даже исходя из этих противоречивых оценок (хотя и сделанных из одинаковых предпосылок) видно, что нужно внести ясность в некоторые определения:

1. Требуемый эмиттанс для эксперимента, который будет взят за инвариант;
2. Определение эмиттанса для барьерного ВЧ и соответствующая длина сгустка;

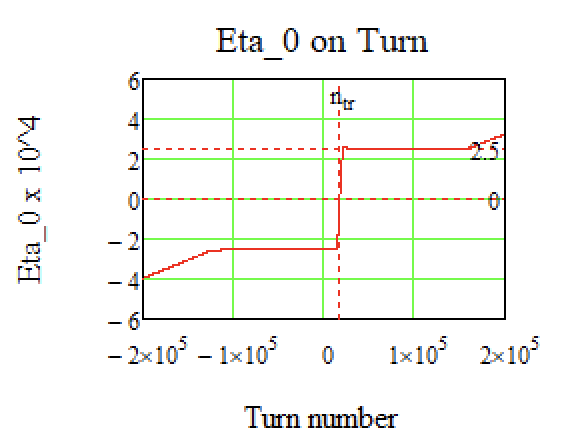
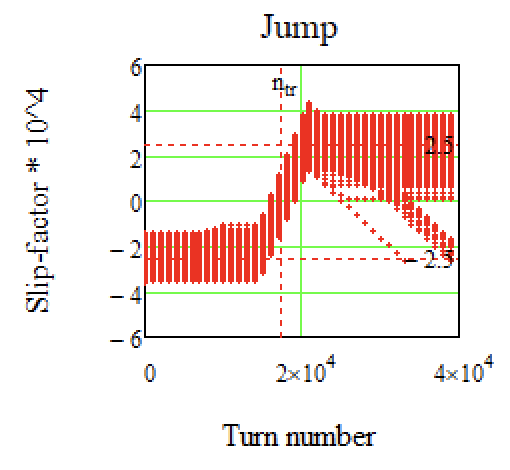
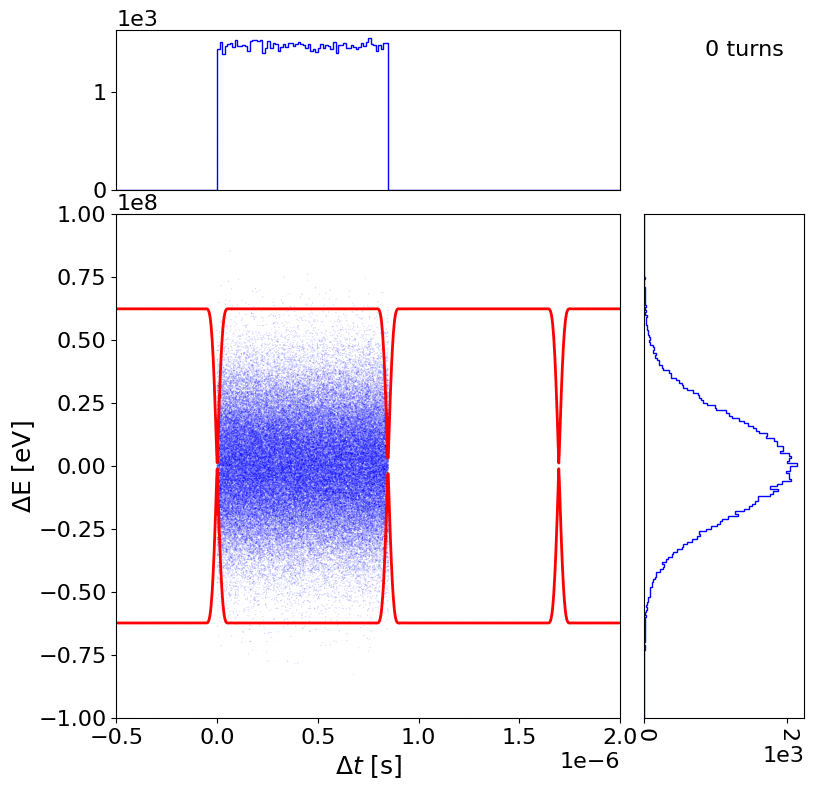
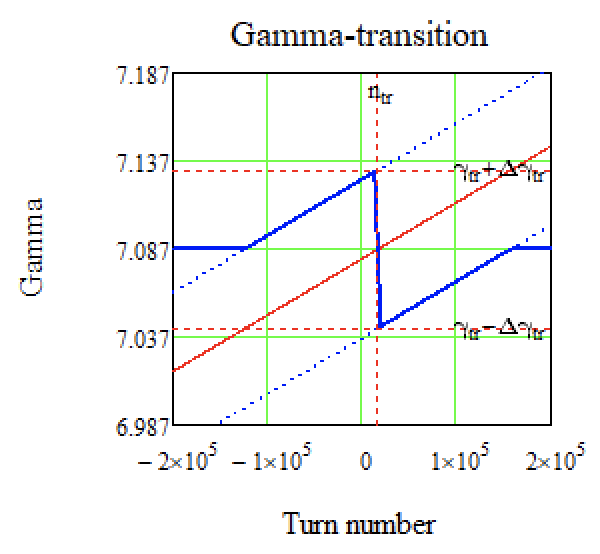
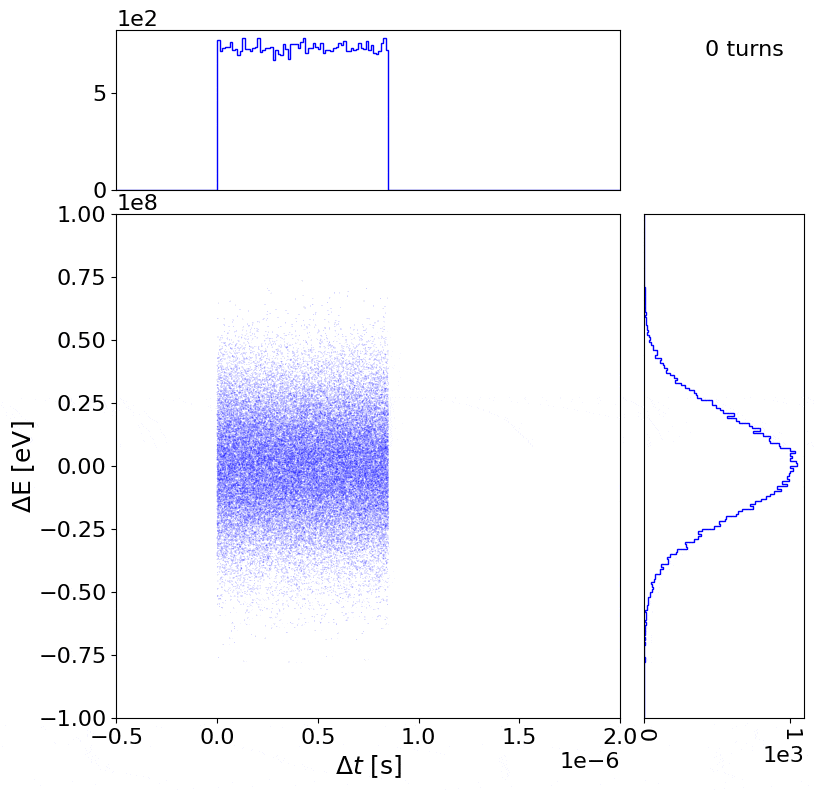


Рис. 3 Соответствующее изменение (для частицы с )

Рис. 4 Изменение коэффициента проскальзывания для частиц с ненулевым .

Рис. 2 Изменение критической энергии для барьерного ВЧ

Рис. 5 Динамика продольного фазового портрета для случая удержания пучка вблизи нулевого значения

Рис. 6 Динамика продольного фазового портрета для скачка через критическую энергии в отсутствии барьеров.

**Ссылки**

[1] П.Р. Зинкевичем, отчёт, Исследование устойчивости интенсивных протонных пучков, в коллайдере NICA, 2019

[2] K. Y.  Ng, Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities, Fermilab-FN-0713, Long Beach, CA, 2002

[3] Е. М. Сыресин и др. Формирование поляризованных протонных пучков в ускорительных комплексе NICA, 2021

[4] И.Н. Мешков, Светимость ионного коллайдера, 2019