Санкт-Петербургский государственный университет

Факультет прикладной математики – процессов управления

**Горелышев Иван Васильевич**

**Выпускная квалификационная работа аспиранта**

**Оптимизация фазового объема пучка в коллайдере NICA для применения системы стохастического охлаждения**

Направление 09.06.01 Информатика и вычислительная техника

Образовательная программа МК.3021.2017 «Системный анализ, информатика и управление»

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук,  
доцент Сидорин А. О.

Рецензент:

гл. инженер Базовой установки

Нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ,

д.ф.-м.н., профессор Сыресин Е.М.

Санкт-Петербург

2021

Аннотация

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Россия) разрабатывается новый ускорительно-коллайдерный комплекс NICA. Достижению максимальной светимости в коллайдере препятствует процесс нагрева пучка из-за внутрипучкового рассеяния. Для препятствия нагреву и стабилизации фазового объема пучка в коллайдере предусмотрена система стохастического охлаждения.

В данной работе решена задача оптимизации параметров фазового объема пучка для получения минимального темпа нагрева вызванного внутрипучковым рассеянием. Приведено сравнение темпов нагрева от внутрипучкового рассеяния и стохастического охлаждения для проектного значения интенсивности пучка в коллайдере NICA. Вычислены значения интенсивности пучка и светимости коллайдера NICA при равенстве темпов нагрева от внутрипучкового рассеяния и стохастического охлаждения.

Abstract

Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) is under development at Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Russia). Beam heating process due to intrabeam scattering prevents the achievement of the collider maximum luminosity. In order to counteract the heating and to stabilize the beam phase space volume in the collider the stochastic cooling system is provided.

In the course of this paper the beam phase space volume optimisation problem is solved to obtain the minimal rates of heating caused by intrabeam scattering. The comparison of the intrabeam scattering and stochastic cooling rates for the project value of the NICA collider beam intensity is provided. The values of beam intensity and NICA collider luminosity at the equillibrium between the intrabeam scattering and stochastic cooling rates are calculated.

Содержание

[Введение 4](#_Toc73485766)

[Постановка задачи 6](#_Toc73485767)

[Обзор литературы 7](#_Toc73485768)

[Глава 1. Внутрипучковое рассеяние 9](#_Toc73485769)

[Свойства ВПР и методика расчета темпов нагрева 9](#_Toc73485770)

[Решение задачи оптимизации 14](#_Toc73485771)

[Глава 2. Сохранение фазового объема. Светимость 19](#_Toc73485772)

[Расчет темпа стохастического охлаждения 19](#_Toc73485773)

[Cравнение времен, светимость 26](#_Toc73485774)

[Выводы 29](#_Toc73485775)

[Заключение 30](#_Toc73485776)

[Список литературы 31](#_Toc73485777)

[Приложение 32](#_Toc73485778)

# Введение

В Объединенном Институте Ядерных Исследований разрабатывается новый ускорительно-коллайдерный комплекс NICA [1]. Основным проектным параметром любой подобной установки является максимально достижимая светимость. Так как светимость характеризует интенсивность столкновения частиц пучка, ее значение возрастает с увеличением количества ускоряемых частиц. Частицы пучка в коллайдере могут ускоряться только при наличии электрического заряда, собираясь в сгустки в процессе ускорения высокочастотным электрическим полем. Наличие же большого количества заряженных частиц в сгустке с зарядом одного знака приводит к расталкиванию частиц и расширению пучка (т.н. внутрипучковому рассеянию или ВПР). При ограниченном объеме пучковой камеры частицы расширяющегося пучка в конечном итоге достигают камеры и теряются при поглощении камерой. Этот процесс ограничивает максимально возможное количество частиц пучка и приводит к ограничению по светимости.

Первой частью работы является обзор свойств ВПР и методика расчета его характерных времен. Основным выводом является тот факт, что при определенном соотношении между параметрами сгустков, характеризующими температуры соответствующие горизонтальной, вертикальной и продольной степеням свободы пучка, можно достичь минимального темпа ВПР. В свою очередь, минимальный темп ВПР накладывает наименее жесткие технические требования на системы, предназначенные для его компенсации.

Скомпенсировать процесс ВПР можно с помощью применения методов охлаждения пучка. В своей исследовательской работе мы рассматриваем систему стохастического охлаждения. Она представляет собой широкополосную высокочастотную систему обратной связи, работающую независимо для горизонтальной, вертикальной и продольной степеней свободы пучка. Во второй части работы дано описание алгоритма расчета характерного времени стохастического охлаждения, приведено сравнение темпов ВПР и охлаждения для параметров коллайдера NICA и показана возможность достижения проектной светимости.

# Постановка задачи

В интервале кинетических энергий пучка от 3.0 до 4.5 ГэВ/н, для структурных функций коллайдера NICA:

1. Определить параметры (горизонтальный эмиттанс *εx*, вертикальный эмиттанс *εy* и импульсный разброс *σp*) фазового объема пучка с учетом проектных ограничений

,

при которых максимальный по одной из степеней свободы пучка темп роста фазового объема , вызванный ВПР, минимален, т.е.:

1. Вычислить темп ВПР и максимальный темп стохастического охлаждения для проектного значения интенсивности пучка 2.75×109 частиц в сгустке. Сравнить полученные результаты.
2. Вычислить интенсивность пучка и соответствующую ей светимость, при которой темпы стохастического охлаждения равны темпам нагрева пучка от ВПР.

# Обзор литературы

В качестве основы для ознакомления с данной работой можно выделить статью [2]. В этой статье приведены формулы для светимости коллайдера (в т.ч. NICA); определено, что основным процессом, ведущим к нагреву пучка, является ВПР; обосновано применение стохастического охлаждения для сохранения фазового объема пучка.

Для расчета темпов ВПР существует два теоретических подхода. Исторически первой возникла работа А. Пивински 1974 года [3]. Подход Пивински основывается на модели упругих парных столкновений в Кулоновском поле, который изначально был применен только к ускорителям со слабой фокусировкой. Другой подход [4] был представлен в 1983 году Бьеркеном и Мтингвой. Он основан на аппарате физики однородной однокомпонентной плазмы и опирается на кинетическое уравнение Ландау [5]. В той работе расчет темпов роста эмиттанса был приведен уже для машин с жесткой фокусировкой. Параллельно для машин с жесткой фокусировкой подход Пивински был развит М. Мартини в 1984 году в работе [6]. На тот момент обе теории учитывали не все возможные связи движения пучка между степенями свободы, но это было приемлемо для большинства ускорителей того времени. Позднее наиболее общий формализм в первом случае был доработан Пивински [7], а в подходе физики плазмы – в работе В. Лебедева и С. Нагайцева [8]. В текущей работе будет использован именно подход физики плазмы, поскольку в нем не берущиеся аналитически интегралы были приведены к стандартным эллиптическим, что является удобным с вычислительной точки зрения.

Стохастическое охлаждение – метод уменьшения разброса скоростей и поперечных размеров пучка частиц в кольцевых ускорителях с помощью широкополосной системы обратной связи. Идея метода впервые была предложена Симоном ван дер Меером в 1968 году. Через три года был зарегистрирован [9] первый сигнал, вызванный статистическими флуктуациями конечного числа частиц в пучке, что послужило основой для развития идеи. Сама же идея была опубликована годом позднее в работе [10], где была представлена упрощенная теория охлаждения пучка в поперечном направлении. Следующей знаковой работой по развитию как теоретического подхода, так и технической базы является работа [11]. В ней впервые был предложен подход, который опирается на аппарат физики плазмы, а именно на уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, а также позволяет описывать эволюцию функции распределения пучка как в поперечном, так и в продольном направлении. С технической стороны в этой работе впервые было предложено использование гребенчатого фильтра для коррелированного подавления шумов, тем самым ускоряя характерный темп охлаждения. Наиболее полно моделирование динамики пучка в процессе стохастического охлаждения с использованием уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова представлено в книгах [12,13] с подробным описанием как физики процесса, так и технических параметров системы стохастического охлаждения.

# Глава 1. Внутрипучковое рассеяние

## Свойства ВПР и методика расчета темпов нагрева

Внутрипучковое рассеяние - рассеяние частиц пучка на других частицах того же пучка – условно разделяют на два эффекта. Однократное рассеяние на большой угол, приводящее к гибели частиц – так называемый эффект Тушека, который может существенно ограничивать время жизни частиц в электрон-позитронных коллайдерах. Для ионных накопителей этот эффект не играет существенной роли и основной вклад в эволюцию параметров пучка дает многократное рассеяние на малые углы. Этот процесс приводит как к изменению проекций фазового объема на главные фазовые плоскости, так и к изменению полного (шестимерного) фазового объема пучка.

Как известно, теорема Лиувилля, утверждающая сохранение шестимерного фазового объема, строго доказывается только для ансамбля невзаимодействующих частиц при движении во внешних электромагнитных полях. Физические причины нарушения теоремы Лиувилля в присутствии внутрипучкового рассеяния можно пояснить на примере релаксации однородной однокомпонентной плазмы, имеющей разные температуры трех степеней свободы. Эволюция функции распределения по скоростям частиц в такой плазме описывается кинетическим уравнением Ландау

,

здесь *n* – плотность плазмы, *r0* – классический радиус частицы, *с* – скорость света, *ω* – вероятность столкновений:

,

кулоновский логарифм , рассчитывается по минимальному и максимальному прицельным параметрам , , где , – среднеквадратичные скорости.

При нормальном распределении частиц по скоростям, которое при соответствующем выборе системы координат может быть записано в виде

,

из кинетического уравнения можно найти производные по времени от моментов второго порядка функции распределения в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

функция *Ψ(x,y,z)* выражается через эллиптические интегралы второго рода *RD(x,y,z)*

,

здесь .

Функция *Ψ(x,y,z)* выбрана таким образом, что она зависит только от отношения ее переменных, и не зависит от *r*. Она симметрична по отношению к переменным *y* и *z*, и нормализована так, что *Ψ(*0*,*1,1*) =* 1*.* Легко показать, что квадрат полной скорости в процессе релаксации сохраняется, т.е. полная энергия стохастического движения остается неизменной, при этом более «горячие» степени свободы охлаждаются, а более «холодные» нагреваются. Процесс завершается при достижении термодинамического равновесия. Начальный фазовый портрет ансамбля частиц в пространстве скоростей представляет собой эллипсоид, который эволюционирует к шару с радиусом . Объем шара больше, чем объем любого начального эллипсоида, т.е. фазовый объем в процессе релаксации возрастает и стремится к некоторой максимальной величине, а темп его роста падает при приближении к равновесию.

Качественно картина процесса не изменится, если поместить плазму в стационарную потенциальную яму, сформированную внешними электромагнитными полями. При этом плазма также возвращается к равным температурам степеней свободы, полная энергия стохастического движения остается неизменной, а шестимерный фазовый объем возрастает и стремится к некоторой конечной величине. Конкретный вид функции распределения в равновесии зависит от формы потенциальной ямы. Аналогичная ситуация имеет место, например, в накопителе с мягкой (азимутально однородной) фокусировкой.

В накопителе с жесткой фокусировкой ситуация кардинально изменяется. При этом периодический канал не обязательно должен быть знакопеременным, а, например, может состоять из последовательности аксиальных линз (фокусирующих в обеих главных плоскостях), разделенных участками дрейфа. Подобная ситуация имеет место в линейных ускорителях с поперечной фокусировкой с помощью симметричных триплетов квадрупольных линз. Знакопеременный канал из аксиальных линз реализуется, например, в линейных ускорителях с фазопеременной фокусировкой. При прохождении пучка через линзу разброс частиц по поперечным скоростям изменяется, что каждый раз приводит к нарушению равновесия, которое оказывается в принципе недостижимым. Это приводит к увеличению полной энергии стохастического движения частиц (за счет кинетической энергии направленного движения) и росту шестимерного фазового объема.

При произвольных начальных температурах степеней свободы процесс развивается следующим образом. На начальном этапе происходит сравнительно быстрое изменение эмиттансов пучка (при этом некоторые из степеней свободы могут даже «охлаждаться»). Он завершается установлением некоторого отношения эмиттансов, при котором темпы нагрева, определяемые как

для всех степеней свободы становятся равными. В дальнейшем достигнутое отношение эмиттансов сохраняется, и они продолжают расти с одинаковыми темпами. Величина темпа нагрева пропорциональна фазовой плотности частиц пучка, поэтому темп нагрева уменьшается с увеличением фазового объема, и эмиттансы возрастают пропорционально квадратному корню из времени.

Отношение эмиттансов, соответствующее равным темпам нагрева, зависит от свойств оптической структуры накопителя и примерно соответствует равным усредненным по периметру температурам степеней свободы. Такой режим можно условно рассматривать как аналогичный термодинамическому равновесию в стационарной потенциальной яме. При равной фазовой плотности этот режим соответствует минимальным темпам нагрева: отклонение любого из эмиттансов от его равновесного значения приводит к увеличению темпа роста как минимум для одной степени свободы. Именно такой режим рассматривается при оценках предельно достижимых параметров в коллайдере NICA.

Из-за разницы в темпах охлаждения для разных степеней свободы параметры сгустков будут несколько отклонятся от термодинамического равновесия. В предельном случае можно охлаждать только одну из степеней свободы, а стабилизация эмиттансов для двух других степеней свободы будет достигаться за счет перераспределения энергии в охлаждаемую степень свободы (так называемое «симпатическое» охлаждение).

Для расчётов темпов изменения эмиттансов с учетом реальной оптической структуры накопителя необходимо выполнить следующую последовательность шагов. В каждой точке ускорителя в системе отсчета связанной с пучком вычислить темп изменения среднеквадратичных скоростей по формуле (1). Затем перейти от системы отсчета, связанной с пучком, к лабораторной системе отсчета, связанной с ускорителем и усреднить полученные темпы по периметру кольца. Таким образом темпы изменения эмитансов записываются в следующем виде:

здесь , и *αi* , *βi* , *γi* – структурные функции кольца, угловые скобки обозначают усреднение по периметру накопителя. Коэффициенты *Iij* вычисляются в каждой точке кольца с помощью следующих интегралов

,

где константа *А* определена как

,

матрица *Λ=I·λ+L*, *I* – единичная матрица, а матрица *L* вычисляется через среднеквадратичные параметры пучка и структурные функции кольца, в соответствии со следующей формулой:

Достаточно полный набор значений структурных функций коллайдера NICA приведен в приложении в таблице 5. Для наглядности горизонтальная и вертикальная *β*-функции ускорителя приведены на рисунке 1, а горизонтальная и вертикальная дисперсии – на рисунке 2. Значения параметров *αi* и *Dpi* неявно приведены на графиках, поскольку являются значениями производных по координате *s* для *βi* и *Di* соответственно.

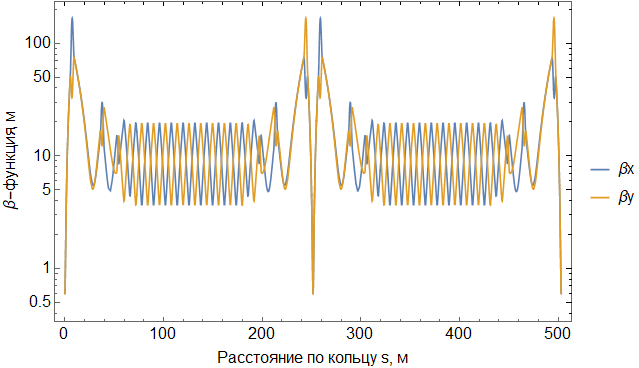


Рисунок 1. Структурные функции коллайдера NICA: горизонтальная функция *βх* и вертикальная – *βy.*

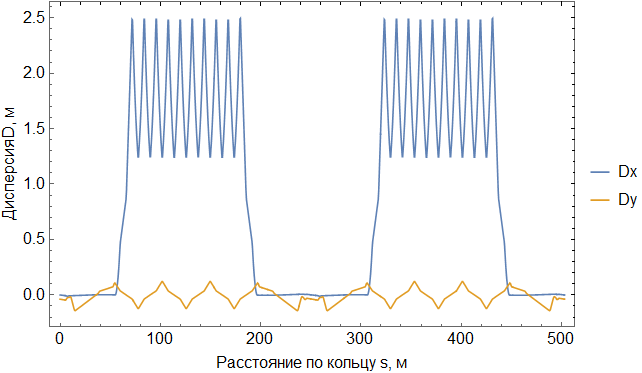


Рисунок 2. Структурные функции коллайдера NICA: горизонтальная дисперсия *Dх* и вертикальная дисперсия *Dy.*

## Решение задачи оптимизации

В качестве метода решения был использован классический алгоритм градиентного спуска [14]. В начальном приближении значения всех параметров соответствовали верхним границам допустимых значений. Результаты решения задачи оптимизации для 16 точек из интервала кинетической энергии от 3.0 до 4.5 ГэВ/н приведены в таблице 1. По итогам

Таблица 1. Оптимальные значения параметров фазового объема в интервале кинетических энергий от 3.0 до 4.5 ГэВ/н*.*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Екин*, *ГэВ/н* | *εx , π.мм.мрад* | *εy, π. мм.мрад* | *σp* | *J(εx, εy, σp), 10-4c-1* |
| 3,0 | 1,100 | 0,951 | 1,214 | 1,357 |
| 3,1 | 1,100 | 0,942 | 1,246 | 1,220 |
| 3,2 | 1,100 | 0,934 | 1,276 | 1,101 |
| 3,3 | 1,100 | 0,925 | 1,307 | 0,998 |
| 3,4 | 1,100 | 0,916 | 1,336 | 0,908 |
| 3,5 | 1,100 | 0,907 | 1,366 | 0,829 |
| 3,6 | 1,100 | 0,898 | 1,395 | 0,760 |
| 3,7 | 1,100 | 0,888 | 1,423 | 0,698 |
| 3,8 | 1,100 | 0,879 | 1,451 | 0,644 |
| 3,9 | 1,100 | 0,869 | 1,478 | 0,596 |
| 4,0 | 1,100 | 0,859 | 1,505 | 0,552 |
| 4,1 | 1,100 | 0,849 | 1,531 | 0,514 |
| 4,2 | 1,100 | 0,839 | 1,557 | 0,479 |
| 4,3 | 1,100 | 0,829 | 1,582 | 0,448 |
| 4,4 | 1,100 | 0,819 | 1,607 | 0,419 |
| 4,5 | 1,100 | 0,809 | 1,630 | 0,394 |

завершения работы алгоритма оптимальное значение горизонтального эмиттанса осталось на верхней границе допустимых значений и составило 1,1 π мм.мрад. на всем интервале кинетических энергий пучка. Оптимальные значения вертикального эмиттанса и среднеквадратичного разброса по импульсу в зависимости от кинетической энергии пучка приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Для проверки решения на соответствие условию минимума в таблицах 2 – 4 приведены значения целевой функции в окрестности предполагаемых минимумов при кинетической энергии пучка 3.0, 3.8 и 4.5 ГэВ/н соответственно.

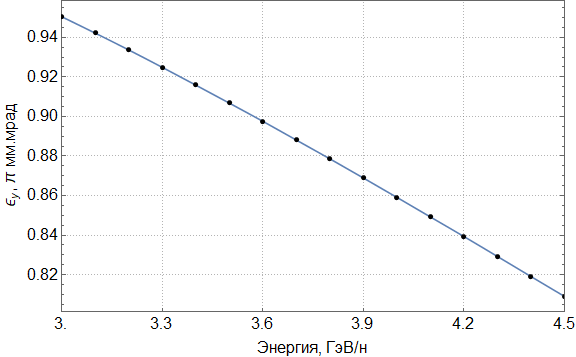


Рисунок 3. Оптимальное значение вертикального эмиттанса в зависимости от кинетической энергии пучка.

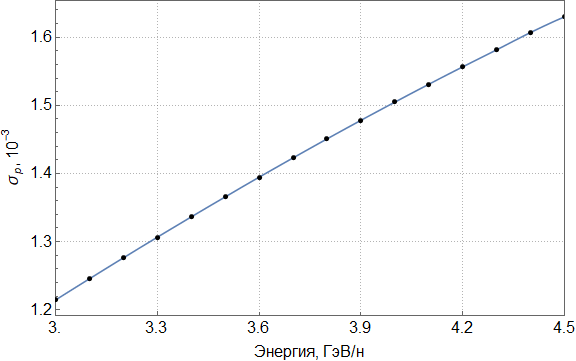


Рисунок 4. Оптимальное значение среднеквадратичного разброса по импульсу в зависимости от кинетической энергии пучка.

Таблица 2 – значения целевой функции *J* в окрестности минимума при кинетической энергии пучка 3,0 Гэв/н

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *εx , π. мм.мрад* | *εy, π. мм.мрад* | *σp* | *J(εx, εy, σp), 10-4c-1* |
| 1,099 | 0,950 | 1,213 | 13,571 |
| 1,099 | 0,950 | 1,214 | 13,584 |
| 1,099 | 0,950 | 1,215 | 13,616 |
| 1,099 | 0,951 | 1,213 | 13,585 |
| 1,099 | 0,951 | 1,214 | 13,588 |
| 1,099 | 0,951 | 1,215 | 13,610 |
| 1,099 | 0,952 | 1,213 | 13,643 |
| 1,099 | 0,952 | 1,214 | 13,635 |
| 1,099 | 0,952 | 1,215 | 13,646 |
| 1.100 | 0,950 | 1,213 | 13,591 |
| 1.100 | 0,950 | 1,214 | 13,592 |
| 1,100 | 0,950 | 1,215 | 13,612 |
| 1,100 | 0,951 | 1,213 | 13,580 |
| 1,100 | 0,951 | 1,214 | 13,570 (min.) |
| 1,100 | 0,951 | 1,215 | 13,580 |
| 1,100 | 0,952 | 1,213 | 13,612 |
| 1,100 | 0,952 | 1,214 | 13,592 |
| 1,100 | 0,952 | 1,215 | 13,591 |

Таблица 3 – значения целевой функции *J* в окрестности минимума при кинетической энергии пучка 3,8 Гэв/н

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *εx , π. мм.мрад* | *εy, π. мм.мрад* | *σp* | *J(εx, εy, σp), 10-4c-1* |
| 1,099 | 0,878 | 1,450 | 6,4414 |
| 1,099 | 0,878 | 1,451 | 6,4499 |
| 1,099 | 0,878 | 1,452 | 6,4673 |
| 1,099 | 0,879 | 1,450 | 6,4546 |
| 1,099 | 0,879 | 1,451 | 6,4573 |
| 1,099 | 0,879 | 1,452 | 6,4689 |
| 1,099 | 0,880 | 1,450 | 6,5176 |
| 1,099 | 0,880 | 1,451 | 6,5146 |
| 1,099 | 0,880 | 1,452 | 6,5205 |
| 1.100 | 0,878 | 1,450 | 6,4634 |
| 1.100 | 0,878 | 1,451 | 6,4647 |
| 1,100 | 0,878 | 1,452 | 6,4749 |
| 1,100 | 0,879 | 1,450 | 6,4441 |
| 1,100 | 0,879 | 1,451 | 6,4396 (min.) |
| 1,100 | 0,879 | 1,452 | 6,4441 |
| 1,100 | 0,880 | 1,450 | 6,4748 |
| 1,100 | 0,880 | 1,451 | 6,4646 |
| 1,100 | 0,880 | 1,452 | 6,4633 |

Таблица 4 – значения целевой функции *J* в окрестности минимума при кинетической энергии пучка 4,5 Гэв/н

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *εx , π. мм.мрад* | *εy, π. мм.мрад* | *σp* | *J(εx, εy, σp), 10-4c-1* |
| 1,099 | 0,808 | 1,629 | 3,9422 |
| 1,099 | 0,808 | 1,630 | 3,9484 |
| 1,099 | 0,808 | 1,631 | 3,9598 |
| 1,099 | 0,809 | 1,629 | 3,9555 |
| 1,099 | 0,809 | 1,630 | 3,9579 |
| 1,099 | 0,809 | 1,631 | 3,9657 |
| 1,099 | 0,810 | 1,629 | 4,0326 |
| 1,099 | 0,810 | 1,630 | 4,0313 |
| 1,099 | 0,810 | 1,631 | 4,0353 |
| 1.100 | 0,808 | 1,629 | 3,9699 |
| 1.100 | 0,808 | 1,630 | 3,9710 |
| 1,100 | 0,808 | 1,631 | 3,9773 |
| 1,100 | 0,809 | 1,629 | 3,9415 |
| 1,100 | 0,809 | 1,630 | 3,9389 (min) |
| 1,100 | 0,809 | 1,631 | 3,9415 |
| 1,100 | 0,810 | 1,629 | 3,9772 |
| 1,100 | 0,810 | 1,630 | 3,9708 |
| 1,100 | 0,810 | 1,631 | 3,9697 |

# Глава 2. Сохранение фазового объема. Светимость

## Расчет темпа стохастического охлаждения

Не ограничивая общности, приведем вывод уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для продольного стохастического охлаждения. Уравнение описывает поведение во времени функции плотности распределения

здесь *Е* отклонение от номинальной кинетической энергии *Еобр*, таким образом функция *ψ* показывает сколько частиц отклонилось от номинальной энергии на величину *Е*. Определим поток *Ф*, как число частиц, изменение отклонения энергии которых пересекает *Еобр*за единицу времени. Получим уравнение непрерывности

Рассмотрим частицы пересекающие за оборот некоторое *E1* и пусть эти частицы находятся в диапазоне *∆E* между *Е0* и *Е1*, тогда количество таких частиц равно

Разложим ψ в ряд отбросив члены выше первого порядка

проинтегрируем

и, определив средний поток как

получим

.

Изменение траектории частицы сигналом на исполняющем устройстве можно разделить на две составляющие: когерентную от самой частицы и некогерентную от шумов системы и других частиц:

Так как нас интересует движение частиц за промежуток много больший времени обращения, для расчета *E* будем оперировать со средними величинами *Ек* и *Енек*. Таким образом имеем

предполагая, что

Подставим данные средние величины в выражение для среднего потока и запишем

Введем обозначения для функций трения *F* и диффузии *D*, сопоставив их с когерентным и некогерентным эффектом:

Тогда уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова окончательно запишется так

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Темп охлаждения по определению запишем

В соответствии с определением начального момента функции распределения, производная момента по времени равна

Поставив из уравнения (2) выражение для производной функции распределения по времени, получим

Проинтегрируем это выражение по частям и с учетом краевых условий получим окончательное выражение для расчета темпа стохастического охлаждения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Подставляя вместо *F* и *D* частотные характеристики реальной системы охлаждения, мы сможем моделировать динамику охлаждения.

Систему стохастического охлаждения по своему составу можно разбить на следующие функциональные блоки (Рис. 5): пикап (детектор сигнала) с передаточной функцией *Zp*, гребенчатый фильтр с функцией *Hc*, линию задержки сигнала *LD*, каскад усилителей *GA* и кикер (исполнительное устройство) *Kk*

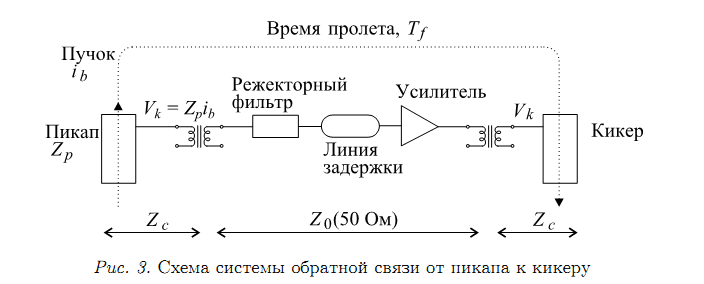


Рисунок 5. Функциональная схема системы стохастического охлаждения.

Частица с зарядом *qe*, пролетающая через пикап с периодом *Т*,наводит ток *ib* в виде периодической *δ*-функции

Фурье-образ тока частицы в рабочем диапазоне частот выглядит следующим образом

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

здесь *n1* и *n2* номера нижней и верхней гармноник частоты обращения частиц в полосе частот пропускания системы. Фурье образ напряжения, наведенного произвольной частицей на кикере *Vk*, есть произведение всех передаточных функций на Фурье образ тока пучка, зарегистрированного на пикапе.

Сигнал всех частиц проходит через систему, задерживаясь на фиксированное время *TD*. При этом время пролета частицы от пикапа до кикера по пучковой камере *TF* зависит от частоты обращения частицы. Следовательно, сигнал к медленным частицам доходит с опережением, а к быстрым с опозданием. в момент времени *t=TD+∆TF*

При коррекции собственным сигналом энергия частицы меняется на

Переход от зависимости по частоте к зависимости по энергии выражается через слип фактор ускорителя *η* и лоренц фактор *γ*

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Тогда коррекция сигнала в зависимости от отклонения по энергии равна

И окончательно функция силы трения в зависимости от отклонения по энергии пучка ч учетом передаточных функций системы

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Некогерентный эффект пропорционален мощности шума, состоящего из двух компонент: тепловых шумов пикапа и усилителя и дробового шума пучка.

здесь *Pa* – мощность тепловых шумов, *Pb* – мощность Шоттки-шума пучка, *Z0* – характеристический импеданс системы 50 Ом.

Для описания дробового шума рассмотрим *N* частиц с зарядом *qe* обращающихся с частотой *f0*. Как было показано в уравнении (4), каждая из частиц наводит сигнал в виде дельта функции. Из фурье-образа этого сигнала видно, что амплитуда тока одной частицы равна *2qef0*. Все частицы случайно распределены по фазам, следовательно, для *N* частиц среднее квадратичное значение тока

Тогда плотность мощности на выходе из пикапа и мощность тока для n-ой полосы Шоттки определяются как

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Распределение по частотам через соотношение энергии с частотой сводится к распределению по энергии

Пройдя все компоненты системы, итоговая плотность мощности на кикере

Некогерентный вклад дробового шума

и окончательно диффузионный член от пучка

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Плотность тепловых шумов состоит из двух слагаемых

где *k* – постоянная Больцмана. Температура *Т1* соответствует абсолютной термодинамической температуре пикапа. Эффективная температура *Т2* вводится через коэффициент шума усилителя *NF* и его абсолютную температуру *T20*

Учитывая передаточные функции системы получим

итоговый некогерентный член будет записан так

И окончательно диффузионный член от тепловых шумов

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Конкретное значение инкремента стохастического охлаждения можно вычислить по формуле 3 с учетом проектных параметров системы и коллайдера, указанных в приложении в таблицах 6 и 7. В выражение для инкремента входит сумма функций трения и диффузии. Максимальный темп стохастического охлаждения соответствует минимуму отрицательного значения инкремента *λ*. Согласно уравнениям 5–7 сила трения зависит от усиления линейно, а диффузия – квадратично. Подобное выражение можно условно записать, как

а решение такой задачи хорошо известно

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

## Cравнение времен, светимость

Основным проектным параметром любого ускорителя является максимальная светимость. Светимость квадратично зависит от числа ускоряемых частиц или другими словами интенсивности пучка. Максимальная интенсивность в коллайдере NICA может быть достигнута при равенстве темпов нагрева от ВПР и стохастического охлаждения. Для определения максимальной интенсивности пучка необходимо сначала провести расчеты темпов ВПР и охлаждения для произвольного значения интенсивности пучка. Для определенности возьмем проектное значение *N0* = 2,75×109 частиц в сгустке. Характерные времена нагрева от ВПР и стохастического охлаждения для выбранного значения интенсивности представлены на рисунке 6.

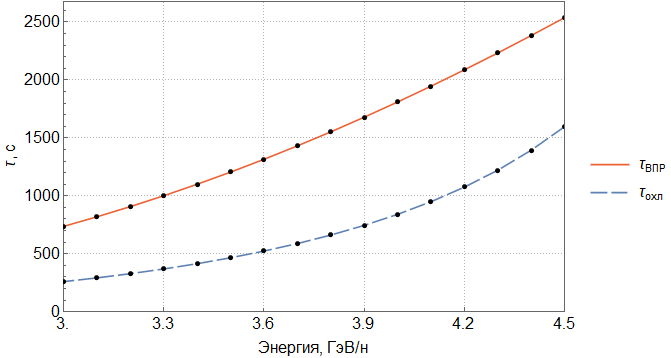


Рисунок 6. Характерные времена нагрева от ВПР и стохастического охлаждения в зависимости от кинетической энергии пучка.

Из рисунка видно, что при выбранной интенсивности темп охлаждения быстрее темпа нагрева. Зная также, что темп нагрева прямо пропорционален интенсивности, а темп охлаждения обратно пропорционален, можно определить максимальную интенсивность *Neq* по следующей формуле

Интенсивность пучка, выраженная через число частиц в сгустке, при равных темпах нагрева и охлаждения представлена на рисунке 7.

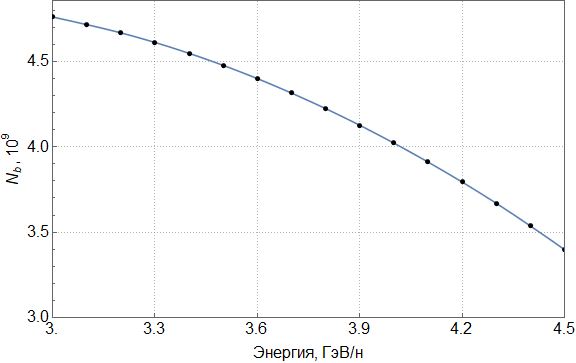


Рисунок 7. Интенсивность пучка при равных темпах нагрева и охлаждения в зависимости от кинетической энергии пучка.

Светимость в случае встречных пучков определяется по следующей формуле

здесь *c* – скорость света, *β* – отношение скорости частицы к скорости света, *Nb* – число сгустков, *N* – число частиц в сгустке, *β\** – бета-функция ускорителя в точке встречи пучков, *C* – периметр ускорителя, *σs* – среднеквадратичная длина сгустка. Максимально достижимая светимость в зависимости от кинетической энергии пучка представлена на рисунке 8. Из графика видно, что максимальная светимость превышает проектное значение 1027 см-2с-1 на всем интервале кинетических энергий пучка.

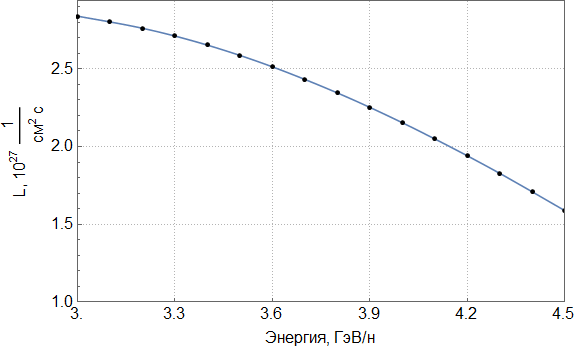


Рисунок 8. Максимальная светимость в зависимости от кинетической энергии пучка.

# Выводы

Поставленная оптимизационная задача по поиску параметров фазового объема пучка, соответствую в коллайдере NICA решена для 16 точек из требуемого интервала кинетических энергий пучка. В начальной, средней и конечной точках интервала кинетических энергий пучка экстремум целевой функции проверен на соответствие условию минимума. Полученные оптимальные значения горизонтального эмиттанса, вертикального эмиттанса и среднеквадратичного разброса по импульсу подтвердили начальное предположение о расположении оптимальных параметров фазового объема пучка вблизи верхних границ допустимых значений.

Для проектного значения интенсивности пучка *N0* = 2.7×109 частиц в сгустке, рассчитаны максимальный темп стохастического охлаждения и минимальный темп нагрева пучка от ВПР. Темп охлаждения быстрее темпа нагрева во всем интервале кинетических энергий пучка. В случае равновесия между темпами нагрева и охлаждения интенсивность пучка и светимость коллайдера превышают свои проектные значения на всем интервале кинетических энергий пучка.

# Заключение

По итогам решения оптимизационной задачи определены значения параметров фазового объема пучка, при которых поддержание светимости в коллайдере NICA с помощью системы стохастического охлаждения накладывает на эту систему наименее жесткие требования. Более быстрые темпы стохастического охлаждения, чем темпы нагрева от ВПР при проектных параметрах коллайдера NICA закладывают запас по интенсивности пучка, что позволит с уверенностью достичь целевых значений светимости установки в диапазоне кинетических энергий пучка от 3.0 до 4.5 ГэВ/н.

# Список литературы

1. NICA - Nuclotron-based Ion Collider fAcility URL: https://nica.jinr.ru/
2. С.А. Костромин и др., Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA// Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т.9, №4-5(174-175). с.537-562
3. A. Piwinski, Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Stanford (1974) p.405.
4. J. D. Bjorken, S. K. Mtingwa, Part. Accel. 13, p. 115 (1983).
5. L.D. Landau, JETP, 7, 203 (1937); Phys. Zs. Sowjet, 10, 154 (1936)
6. M. Martini “Intrabeam scattering in the ACOOL-AA machines”, CERN PS/84-9 AA (1984).
7. A. Piwinski, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, World Scientific, Singapore, 1999, p. 125.
8. V. Lebedev, V. Shiltsev, Springer, 2014, Accelerator Phisics at the Tevatron Collider, Chapt. 6, p. 191
9. J. Borer et al., Non-distructive diagnostics of coasting beams with Schottky noise, *Proc. Intenat. Conf. on high Energy Acc. Stanford* (1974), p. 53
10. S. van der Meer, *Stochastic damping of betatron oscillations*, CERN ISR-PO 72/31, 1972
11. G. Carron, L. Thorndahl, Stochastic cooling of momentum spread with filter techniques, CERN/ISR-RF/78-12 and ISR-RF/Note LT/ps
12. H. Stockhorst, T. Katayama, R. Maier, “Beam cooling at COSY and HESR”, Schlusseltechnologien, Vol. 120 (2016) ISBN:978-3-95806-127-9
13. V. Lebedev, V. Shiltsev, Springer, 2014, Accelerator Phisics at the Tevatron Collider, Chapt. 7, p. 279
14. A. Cauchy. Méthode générale pour la résolution des systèmes d’équations simultanées. C. R. Acad. Sci. Paris, 25:536–538, 1847

# Приложение

Таблица 5. Структурные функции коллайдера NICA.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| s, м | βx, м | βy, м | αx | αy | Dx, м | Dpx | Dy, м | Dpy |
| 0,000 | 0,599834 | 0,597453 | -0,00361 | 0,000958 | -6,7E-05 | -0,0011 | -0,03796 | -0,00156 |
| 0,270 | 0,723321 | 0,718954 | -0,45375 | -0,45096 | -0,00036 | -0,0011 | -0,03838 | -0,00156 |
| 0,540 | 1,089878 | 1,084491 | -0,90388 | -0,90288 | -0,00066 | -0,0011 | -0,0388 | -0,00156 |
| 0,810 | 1,699507 | 1,694064 | -1,35401 | -1,3548 | -0,00096 | -0,0011 | -0,03922 | -0,00156 |
| 1,080 | 2,552206 | 2,547673 | -1,80414 | -1,80672 | -0,00126 | -0,0011 | -0,03964 | -0,00156 |
| 1,350 | 3,647975 | 3,645318 | -2,25427 | -2,25864 | -0,00156 | -0,0011 | -0,04006 | -0,00156 |
| 1,620 | 4,986815 | 4,986999 | -2,7044 | -2,71055 | -0,00186 | -0,0011 | -0,04048 | -0,00156 |
| 1,890 | 6,568726 | 6,572716 | -3,15453 | -3,16247 | -0,00215 | -0,0011 | -0,0409 | -0,00156 |
| 2,160 | 8,393707 | 8,402469 | -3,60466 | -3,61439 | -0,00245 | -0,0011 | -0,04132 | -0,00156 |
| 2,430 | 10,46176 | 10,47626 | -4,05479 | -4,06631 | -0,00275 | -0,0011 | -0,04174 | -0,00156 |
| 2,700 | 12,77288 | 12,79408 | -4,50492 | -4,51823 | -0,00305 | -0,0011 | -0,04216 | -0,00156 |
| 2,970 | 15,32707 | 15,35594 | -4,95505 | -4,97015 | -0,00335 | -0,0011 | -0,04258 | -0,00156 |
| 3,240 | 18,12434 | 18,16184 | -5,40518 | -5,42207 | -0,00364 | -0,0011 | -0,043 | -0,00156 |
| 3,510 | 21,16467 | 21,21177 | -5,85531 | -5,87398 | -0,00394 | -0,0011 | -0,04342 | -0,00156 |
| 3,780 | 24,44808 | 24,50574 | -6,30544 | -6,3259 | -0,00424 | -0,0011 | -0,04384 | -0,00156 |
| 4,050 | 27,97455 | 28,04375 | -6,75557 | -6,77782 | -0,00454 | -0,0011 | -0,04426 | -0,00156 |
| 4,320 | 31,7441 | 31,82579 | -7,20571 | -7,22974 | -0,00484 | -0,0011 | -0,04468 | -0,00156 |
| 4,590 | 35,75671 | 35,85187 | -7,65584 | -7,68166 | -0,00514 | -0,0011 | -0,0451 | -0,00156 |
| 4,860 | 40,0124 | 40,12198 | -8,10597 | -8,13358 | -0,00543 | -0,0011 | -0,04552 | -0,00156 |
| 5,130 | 44,51116 | 44,63613 | -8,5561 | -8,5855 | -0,00573 | -0,0011 | -0,04594 | -0,00156 |
| 7,084 | 160,7583 | 32,72484 | -20,1576 | 0,701536 | -0,0109 | -0,00137 | -0,02648 | 0,009117 |
| 10,778 | 64,45588 | 64,64793 | 3,285576 | 3,340099 | -0,00689 | 0,000356 | -0,02059 | -0,01795 |
| 11,911 | 57,25002 | 57,27492 | 3,078373 | 3,155037 | -0,00649 | 0,000356 | -0,05495 | -0,03434 |
| 12,592 | 53,14088 | 53,06516 | 2,953716 | 3,02475 | -0,00625 | 0,000356 | -0,07835 | -0,03434 |
| 13,273 | 49,20157 | 49,03291 | 2,829058 | 2,894463 | -0,006 | 0,000356 | -0,10174 | -0,03434 |
| 14,405 | 43,02954 | 42,7116 | 2,621856 | 2,69871 | -0,0056 | 0,000356 | -0,13608 | -0,01788 |
| 16,495 | 32,86941 | 32,18936 | 2,239395 | 2,316543 | -0,00486 | 0,000356 | -0,13204 | 0,006827 |
| 17,571 | 28,26258 | 27,43364 | 2,042515 | 2,103756 | -0,00447 | 0,000356 | -0,1247 | 0,006827 |
| 18,647 | 24,07939 | 23,13578 | 1,845636 | 1,89097 | -0,00409 | 0,000356 | -0,11736 | 0,006827 |
| 19,723 | 20,31983 | 19,2958 | 1,648756 | 1,678183 | -0,00371 | 0,000356 | -0,11001 | 0,006827 |
| 22,844 | 11,81069 | 10,747 | 1,077627 | 1,060909 | -0,00259 | 0,000356 | -0,08871 | 0,006827 |
| 23,920 | 9,703712 | 8,693103 | 0,880748 | 0,848122 | -0,00221 | 0,000356 | -0,08136 | 0,006827 |
| 24,995 | 8,020369 | 7,097077 | 0,683868 | 0,635335 | -0,00183 | 0,000356 | -0,07402 | 0,006827 |
| 27,974 | 5,569947 | 5,066958 | 0,138795 | 0,046223 | -0,00077 | 0,000356 | -0,05368 | 0,006827 |
| 30,161 | 5,838108 | 5,81075 | -0,26141 | -0,38632 | 1,36E-05 | 0,000356 | -0,03875 | 0,006827 |
| 32,348 | 7,856774 | 8,446481 | -0,66162 | -0,81886 | 0,000793 | 0,000356 | -0,02382 | 0,006827 |
| 34,535 | 11,62595 | 12,97415 | -1,06183 | -1,2514 | 0,001572 | 0,000356 | -0,00889 | 0,006827 |
| 38,772 | 20,2961 | 19,95738 | 7,418279 | -6,42648 | 0,002758 | -0,00087 | 0,025324 | 0,014244 |
| 40,788 | 9,421403 | 23,58628 | 0,979523 | 1,537812 | 0,002161 | -6,4E-05 | 0,038075 | 0,003007 |
| 42,022 | 7,321764 | 20,01031 | 0,723036 | 1,361878 | 0,002082 | -6,4E-05 | 0,041783 | 0,003007 |
| 43,255 | 5,854737 | 16,86827 | 0,46655 | 1,185943 | 0,002003 | -6,4E-05 | 0,045491 | 0,003007 |
| 48,259 | 6,393703 | 8,571304 | -0,57425 | 0,472016 | 0,001682 | -6,4E-05 | 0,060539 | 0,003007 |
| 49,469 | 8,088346 | 7,637731 | -0,82596 | 0,299356 | 0,001604 | -6,4E-05 | 0,064179 | 0,003007 |
| 50,680 | 10,39227 | 7,122091 | -1,07768 | 0,126696 | 0,001527 | -6,4E-05 | 0,067818 | 0,003007 |
| 51,890 | 13,30549 | 7,024384 | -1,32939 | -0,04596 | 0,001449 | -6,4E-05 | 0,071457 | 0,003007 |
| 55,482 | 9,803076 | 12,26002 | -0,88085 | 1,549864 | 0,007266 | 0,023325 | 0,096733 | -0,01308 |
| 60,731 | 17,96214 | 4,650971 | 2,114425 | -0,66291 | 0,520421 | 0,068201 | 0,032437 | -0,00621 |
| 62,003 | 13,07478 | 6,838819 | 1,726915 | -1,05668 | 0,607193 | 0,068201 | 0,024534 | -0,00621 |
| 63,276 | 9,173488 | 10,02866 | 1,339404 | -1,45045 | 0,693966 | 0,068201 | 0,016631 | -0,00621 |
| 64,548 | 6,258259 | 14,2205 | 0,951894 | -1,84423 | 0,780738 | 0,068201 | 0,008728 | -0,00621 |
| 66,851 | 5,276474 | 16,07063 | -0,74832 | 2,082059 | 1,125552 | 0,279673 | -0,00559 | -0,0062 |
| 68,113 | 7,636512 | 11,34363 | -1,12149 | 1,663053 | 1,478549 | 0,279673 | -0,01342 | -0,0062 |
| 69,376 | 10,93855 | 7,674344 | -1,49465 | 1,244047 | 1,831547 | 0,279673 | -0,02124 | -0,0062 |
| 70,638 | 15,18258 | 5,062783 | -1,86781 | 0,825041 | 2,184544 | 0,279673 | -0,02906 | -0,0062 |
| 73,810 | 12,62362 | 6,255779 | 1,808462 | -1,05666 | 2,003624 | -0,26315 | -0,06503 | -0,0149 |
| 79,402 | 5,460258 | 14,0349 | -0,9232 | 1,906272 | 1,436116 | 0,171112 | -0,1036 | 0,014802 |
| 84,994 | 15,63669 | 4,804692 | 2,05376 | -0,79304 | 2,227374 | -0,29304 | -0,02943 | 0,006241 |
| 90,584 | 4,225406 | 17,1877 | -0,65525 | 2,134027 | 1,316619 | 0,146228 | 0,005497 | 0,006013 |
| 96,095 | 19,41887 | 3,697125 | 2,362094 | -0,50874 | 2,486501 | -0,30424 | 0,040433 | 0,015012 |
| 101,529 | 3,763553 | 18,92179 | 0,523053 | -2,26601 | 1,256434 | -0,14696 | 0,120872 | 0,014541 |
| 107,209 | 17,71508 | 4,113789 | -2,23364 | 0,634992 | 2,363765 | 0,302101 | 0,04559 | -0,01509 |
| 112,706 | 4,791781 | 15,55897 | 0,795503 | -2,0366 | 1,368248 | -0,15539 | 0,006234 | -0,00622 |
| 118,298 | 14,07462 | 5,485526 | -1,92806 | 0,923721 | 2,107837 | 0,277612 | -0,02788 | -0,00603 |
| 123,890 | 6,221706 | 12,61295 | 1,050466 | -1,7789 | 1,502436 | -0,18456 | -0,09802 | -0,01473 |
| 129,482 | 11,28485 | 7,111276 | -1,68426 | 1,186995 | 1,910701 | 0,249876 | -0,07048 | 0,014983 |
| 135,074 | 8,05533 | 10,03414 | 1,304534 | -1,52308 | 1,662854 | -0,21513 | -0,01634 | 0,00614 |
| 140,560 | 8,566903 | 9,469358 | -1,37702 | 1,469931 | 1,705287 | 0,224739 | 0,017437 | 0,006134 |
| 146,152 | 10,62692 | 7,600644 | 1,621675 | -1,25366 | 1,862186 | -0,24302 | 0,073373 | 0,015002 |
| 151,744 | 6,646321 | 11,92846 | -1,11432 | 1,714212 | 1,538566 | 0,191617 | 0,09519 | -0,01471 |
| 157,336 | 13,35132 | 5,842451 | 1,87225 | -0,99028 | 2,054307 | -0,27079 | 0,026775 | -0,00601 |
| 162,928 | 5,110341 | 14,78745 | -0,85752 | 1,967005 | 1,399285 | 0,162579 | -0,00733 | -0,00623 |
| 168,520 | 16,42713 | 4,524396 | 2,136778 | -0,73523 | 2,276326 | -0,30264 | -0,04993 | -0,01511 |
| 174,038 | 3,902541 | 18,35198 | -0,56657 | 2,224093 | 1,275249 | 0,146739 | -0,11904 | 0,014508 |
| 179,355 | 19,48981 | 3,67445 | -2,36414 | 0,503386 | 2,490014 | 0,30374 | -0,04032 | 0,014998 |
| 181,396 | 13,34284 | 5,987658 | 1,720527 | -0,99673 | 2,048442 | -0,28078 | -0,02563 | 0,006253 |
| 182,658 | 9,472453 | 9,034158 | 1,345906 | -1,41695 | 1,694042 | -0,28078 | -0,01774 | 0,006253 |
| 183,921 | 6,54774 | 13,14144 | 0,971286 | -1,83717 | 1,339643 | -0,28078 | -0,00985 | 0,006253 |
| 185,999 | 4,673116 | 18,12183 | -0,65151 | 2,144209 | 0,85001 | -0,06858 | 0,00313 | 0,006155 |
| 187,489 | 7,29396 | 12,41387 | -1,10605 | 1,6836 | 0,74774 | -0,06858 | 0,012309 | 0,006155 |
| 188,762 | 10,60186 | 8,629784 | -1,49388 | 1,290599 | 0,660481 | -0,06858 | 0,02014 | 0,006155 |
| 190,034 | 14,89663 | 5,845731 | -1,8817 | 0,897598 | 0,573223 | -0,06858 | 0,027971 | 0,006155 |
| 192,440 | 18,38438 | 4,633765 | 1,515186 | -0,56769 | 0,328045 | -0,15738 | 0,049244 | 0,013362 |
| 198,123 | 12,99533 | 10,06497 | -3,61248 | 3,47422 | -0,00156 | -0,00064 | 0,088066 | -0,0308 |
| 199,767 | 13,03088 | 7,006756 | 1,306424 | 0,02544 | -0,00186 | -4,8E-06 | 0,070983 | -0,00301 |
| 200,689 | 10,79831 | 7,081258 | 1,114898 | -0,10624 | -0,00186 | -4,8E-06 | 0,068207 | -0,00301 |
| 201,611 | 8,918918 | 7,398589 | 0,923372 | -0,23792 | -0,00186 | -4,8E-06 | 0,065431 | -0,00301 |
| 202,388 | 7,609175 | 7,85464 | 0,761944 | -0,34891 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,063091 | -0,00301 |
| 202,658 | 7,212868 | 8,053459 | 0,70586 | -0,38746 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,062279 | -0,00301 |
| 202,928 | 6,846846 | 8,273101 | 0,649777 | -0,42602 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,061466 | -0,00301 |
| 203,198 | 6,511109 | 8,513565 | 0,593693 | -0,46458 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,060653 | -0,00301 |
| 203,468 | 6,205657 | 8,77485 | 0,537609 | -0,50314 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,05984 | -0,00301 |
| 203,738 | 5,930491 | 9,056958 | 0,481526 | -0,5417 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,059027 | -0,00301 |
| 204,008 | 5,68561 | 9,359888 | 0,425442 | -0,58026 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,058214 | -0,00301 |
| 204,278 | 5,471014 | 9,683639 | 0,369358 | -0,61882 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,057401 | -0,00301 |
| 204,548 | 5,286703 | 10,02821 | 0,313274 | -0,65738 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,056588 | -0,00301 |
| 204,818 | 5,132677 | 10,39361 | 0,257191 | -0,69594 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,055775 | -0,00301 |
| 205,088 | 5,008937 | 10,77983 | 0,201107 | -0,7345 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,054962 | -0,00301 |
| 205,358 | 4,915482 | 11,18686 | 0,145023 | -0,77306 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,05415 | -0,00301 |
| 205,628 | 4,852312 | 11,61473 | 0,088939 | -0,81162 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,053337 | -0,00301 |
| 205,898 | 4,819427 | 12,06341 | 0,032856 | -0,85017 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,052524 | -0,00301 |
| 206,168 | 4,816828 | 12,53291 | -0,02323 | -0,88873 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,051711 | -0,00301 |
| 206,438 | 4,844514 | 13,02324 | -0,07931 | -0,92729 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,050898 | -0,00301 |
| 206,708 | 4,902484 | 13,53439 | -0,1354 | -0,96585 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,050085 | -0,00301 |
| 206,978 | 4,990741 | 14,06636 | -0,19148 | -1,00441 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,049272 | -0,00301 |
| 207,248 | 5,109282 | 14,61916 | -0,24756 | -1,04297 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,048459 | -0,00301 |
| 207,518 | 5,258109 | 15,19277 | -0,30365 | -1,08153 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,047646 | -0,00301 |
| 207,788 | 5,43722 | 15,78721 | -0,35973 | -1,12009 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,046834 | -0,00301 |
| 208,058 | 5,646617 | 16,40247 | -0,41581 | -1,15865 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,046021 | -0,00301 |
| 208,328 | 5,8863 | 17,03855 | -0,4719 | -1,19721 | -0,0019 | -4,8E-06 | 0,045208 | -0,00301 |
| 209,273 | 6,963684 | 19,4288 | -0,66819 | -1,33216 | -0,0019 | -4,8E-06 | 0,042363 | -0,00301 |
| 210,218 | 8,412061 | 22,07413 | -0,86448 | -1,46712 | -0,00191 | -4,8E-06 | 0,039517 | -0,00301 |
| 211,163 | 10,23143 | 24,97452 | -1,06078 | -1,60208 | -0,00191 | -4,8E-06 | 0,036672 | -0,00301 |
| 214,563 | 25,77863 | 13,0272 | 7,536817 | -2,74264 | -0,00238 | 0,000838 | 0,007117 | -0,00618 |
| 217,390 | 10,73478 | 12,0091 | 0,977717 | 1,173543 | -0,00104 | 0,000339 | -0,01171 | -0,00682 |
| 219,577 | 7,329727 | 7,822809 | 0,579234 | 0,740626 | -0,0003 | 0,000339 | -0,02661 | -0,00682 |
| 221,764 | 5,667636 | 5,530102 | 0,180752 | 0,307709 | 0,000439 | 0,000339 | -0,04152 | -0,00682 |
| 225,648 | 7,012198 | 6,125989 | -0,52693 | -0,46113 | 0,001754 | 0,000339 | -0,06799 | -0,00682 |
| 228,363 | 11,21593 | 10,08849 | -1,02157 | -0,99851 | 0,002673 | 0,000339 | -0,08649 | -0,00682 |
| 231,077 | 18,10524 | 16,96865 | -1,5162 | -1,53589 | 0,003592 | 0,000339 | -0,10499 | -0,00682 |
| 233,792 | 27,68014 | 26,76647 | -2,01084 | -2,07326 | 0,004511 | 0,000339 | -0,12349 | -0,00682 |
| 236,839 | 41,62565 | 41,22776 | -2,56601 | -2,65633 | 0,005543 | 0,000339 | -0,13972 | 0,009655 |
| 238,197 | 48,93001 | 48,73847 | -2,81341 | -2,88614 | 0,006003 | 0,000339 | -0,10329 | 0,034353 |
| 238,878 | 52,84763 | 52,75947 | -2,93753 | -3,01655 | 0,006233 | 0,000339 | -0,07989 | 0,034353 |
| 239,559 | 56,93436 | 56,95812 | -3,06165 | -3,14695 | 0,006464 | 0,000339 | -0,05649 | 0,034353 |
| 240,466 | 62,6365 | 62,81835 | -3,22687 | -3,30522 | 0,006771 | 0,000339 | -0,02647 | 0,02616 |
| 244,154 | 33,3254 | 167,1803 | 3,344545 | 0,27846 | 0,004899 | -0,00052 | -0,04094 | -0,00372 |
| 246,370 | 44,77961 | 44,99995 | 8,582212 | 8,620886 | 0,005621 | -0,0011 | -0,02994 | -0,00156 |
| 246,640 | 40,26675 | 40,46669 | 8,132081 | 8,168968 | 0,005323 | -0,0011 | -0,03036 | -0,00156 |
| 246,910 | 35,99696 | 36,17746 | 7,68195 | 7,717049 | 0,005024 | -0,0011 | -0,03078 | -0,00156 |
| 247,180 | 31,97024 | 32,13228 | 7,23182 | 7,26513 | 0,004726 | -0,0011 | -0,0312 | -0,00156 |
| 247,450 | 28,1866 | 28,33112 | 6,781689 | 6,813212 | 0,004428 | -0,0011 | -0,03162 | -0,00156 |
| 247,720 | 24,64602 | 24,77401 | 6,331558 | 6,361293 | 0,00413 | -0,0011 | -0,03204 | -0,00156 |
| 247,990 | 21,34851 | 21,46093 | 5,881428 | 5,909375 | 0,003832 | -0,0011 | -0,03246 | -0,00156 |
| 248,260 | 18,29408 | 18,39188 | 5,431297 | 5,457456 | 0,003534 | -0,0011 | -0,03288 | -0,00156 |
| 248,530 | 15,48271 | 15,56687 | 4,981166 | 5,005538 | 0,003235 | -0,0011 | -0,0333 | -0,00156 |
| 248,800 | 12,91442 | 12,9859 | 4,531035 | 4,553619 | 0,002937 | -0,0011 | -0,03372 | -0,00156 |
| 249,070 | 10,58919 | 10,64897 | 4,080905 | 4,1017 | 0,002639 | -0,0011 | -0,03415 | -0,00156 |
| 249,340 | 8,507041 | 8,556066 | 3,630774 | 3,649782 | 0,002341 | -0,0011 | -0,03457 | -0,00156 |
| 249,610 | 6,667959 | 6,707201 | 3,180643 | 3,197863 | 0,002043 | -0,0011 | -0,03499 | -0,00156 |
| 249,880 | 5,071947 | 5,102373 | 2,730513 | 2,745945 | 0,001744 | -0,0011 | -0,03541 | -0,00156 |
| 250,150 | 3,719005 | 3,741581 | 2,280382 | 2,294026 | 0,001446 | -0,0011 | -0,03583 | -0,00156 |
| 250,420 | 2,609134 | 2,624825 | 1,830251 | 1,842108 | 0,001148 | -0,0011 | -0,03625 | -0,00156 |
| 250,690 | 1,742334 | 1,752105 | 1,380121 | 1,390189 | 0,00085 | -0,0011 | -0,03667 | -0,00156 |
| 250,960 | 1,118604 | 1,123421 | 0,92999 | 0,93827 | 0,000552 | -0,0011 | -0,03709 | -0,00156 |
| 251,230 | 0,737945 | 0,738773 | 0,479859 | 0,486352 | 0,000254 | -0,0011 | -0,03751 | -0,00156 |
| 251,500 | 0,600356 | 0,598161 | 0,029728 | 0,034433 | -4,5E-05 | -0,0011 | -0,03793 | -0,00156 |
| 251,770 | 0,705838 | 0,701585 | -0,4204 | -0,41749 | -0,00034 | -0,0011 | -0,03835 | -0,00156 |
| 252,040 | 1,05439 | 1,049045 | -0,87053 | -0,8694 | -0,00064 | -0,0011 | -0,03877 | -0,00156 |
| 252,310 | 1,646013 | 1,640541 | -1,32066 | -1,32132 | -0,00094 | -0,0011 | -0,03919 | -0,00156 |
| 252,580 | 2,480707 | 2,476074 | -1,77079 | -1,77324 | -0,00124 | -0,0011 | -0,03961 | -0,00156 |
| 252,850 | 3,558471 | 3,555642 | -2,22092 | -2,22516 | -0,00154 | -0,0011 | -0,04003 | -0,00156 |
| 253,120 | 4,879306 | 4,879246 | -2,67106 | -2,67708 | -0,00183 | -0,0011 | -0,04045 | -0,00156 |
| 253,390 | 6,443211 | 6,446886 | -3,12119 | -3,129 | -0,00213 | -0,0011 | -0,04087 | -0,00156 |
| 253,660 | 8,250187 | 8,258563 | -3,57132 | -3,58092 | -0,00243 | -0,0011 | -0,04129 | -0,00156 |
| 253,930 | 10,30023 | 10,31427 | -4,02145 | -4,03283 | -0,00273 | -0,0011 | -0,04171 | -0,00156 |
| 254,200 | 12,59335 | 12,61402 | -4,47158 | -4,48475 | -0,00303 | -0,0011 | -0,04213 | -0,00156 |
| 254,470 | 15,12954 | 15,15781 | -4,92171 | -4,93667 | -0,00332 | -0,0011 | -0,04255 | -0,00156 |
| 254,740 | 17,9088 | 17,94563 | -5,37184 | -5,38859 | -0,00362 | -0,0011 | -0,04297 | -0,00156 |
| 255,010 | 20,93113 | 20,97748 | -5,82197 | -5,84051 | -0,00392 | -0,0011 | -0,04339 | -0,00156 |
| 255,280 | 24,19652 | 24,25338 | -6,2721 | -6,29243 | -0,00422 | -0,0011 | -0,04381 | -0,00156 |
| 255,550 | 27,70499 | 27,77331 | -6,72223 | -6,74435 | -0,00452 | -0,0011 | -0,04423 | -0,00156 |
| 255,820 | 31,45654 | 31,53727 | -7,17236 | -7,19626 | -0,00482 | -0,0011 | -0,04465 | -0,00156 |
| 256,090 | 35,45115 | 35,54527 | -7,62249 | -7,64818 | -0,00511 | -0,0011 | -0,04507 | -0,00156 |
| 256,360 | 39,68883 | 39,79731 | -8,07262 | -8,1001 | -0,00541 | -0,0011 | -0,04549 | -0,00156 |
| 256,630 | 44,16958 | 44,29338 | -8,52275 | -8,55202 | -0,00571 | -0,0011 | -0,04591 | -0,00156 |
| 258,321 | 144,3124 | 34,28028 | -37,2832 | 4,857955 | -0,01032 | -0,00267 | -0,02953 | 0,012531 |
| 262,022 | 66,28346 | 66,50155 | 3,336082 | 3,375794 | -0,00699 | 0,000356 | -0,01677 | -0,00976 |
| 263,380 | 57,56116 | 57,59382 | 3,087607 | 3,164688 | -0,00651 | 0,000356 | -0,05322 | -0,03434 |
| 264,061 | 53,43943 | 53,37091 | 2,96295 | 3,034401 | -0,00626 | 0,000356 | -0,07662 | -0,03434 |
| 264,742 | 49,48755 | 49,32551 | 2,838292 | 2,904113 | -0,00602 | 0,000356 | -0,10001 | -0,03434 |
| 265,649 | 44,49074 | 44,21312 | 2,672362 | 2,741462 | -0,0057 | 0,000356 | -0,13001 | -0,02611 |
| 268,846 | 29,27488 | 28,47685 | 2,08737 | 2,152235 | -0,00456 | 0,000356 | -0,12637 | 0,006827 |
| 271,561 | 19,29025 | 18,249 | 1,590595 | 1,615322 | -0,00359 | 0,000356 | -0,10784 | 0,006827 |
| 274,275 | 12,00283 | 10,93629 | 1,093819 | 1,078409 | -0,00262 | 0,000356 | -0,08931 | 0,006827 |
| 276,990 | 7,412621 | 6,538712 | 0,597044 | 0,541496 | -0,00166 | 0,000356 | -0,07078 | 0,006827 |
| 280,952 | 5,55422 | 5,352604 | -0,12801 | -0,24214 | -0,00025 | 0,000356 | -0,04373 | 0,006827 |
| 283,139 | 6,989385 | 7,357688 | -0,52822 | -0,67468 | 0,000533 | 0,000356 | -0,0288 | 0,006827 |
| 285,326 | 10,17505 | 11,25471 | -0,92842 | -1,10722 | 0,001312 | 0,000356 | -0,01387 | 0,006827 |
| 287,977 | 18,93155 | 15,90975 | -6,46195 | 3,065385 | 0,002421 | 0,000977 | 0,004095 | 0,006173 |
| 291,497 | 11,1483 | 26,17634 | 1,148314 | 1,653593 | 0,002213 | -6,4E-05 | 0,035634 | 0,003007 |
| 292,009 | 10,02627 | 24,51943 | 1,041761 | 1,580504 | 0,00218 | -6,4E-05 | 0,037175 | 0,003007 |
| 292,521 | 9,013422 | 22,93742 | 0,935207 | 1,507414 | 0,002147 | -6,4E-05 | 0,038716 | 0,003007 |
| 293,034 | 8,109751 | 21,43029 | 0,828654 | 1,434325 | 0,002114 | -6,4E-05 | 0,040256 | 0,003007 |
| 302,641 | 11,38376 | 7,038062 | -1,16944 | 0,06375 | 0,001498 | -6,4E-05 | 0,069145 | 0,003007 |
| 303,130 | 12,57816 | 7,009833 | -1,27122 | -0,00607 | 0,001467 | -6,4E-05 | 0,070616 | 0,003007 |
| 303,620 | 13,87218 | 7,049935 | -1,373 | -0,07588 | 0,001436 | -6,4E-05 | 0,072088 | 0,003007 |
| 304,109 | 15,26581 | 7,158369 | -1,47478 | -0,1457 | 0,001404 | -6,4E-05 | 0,073559 | 0,003007 |
| 310,018 | 16,72593 | 5,372807 | -1,40693 | 0,726651 | 0,243445 | 0,133091 | 0,056897 | -0,01331 |
| 313,000 | 14,96599 | 5,817452 | 1,886332 | -0,89469 | 0,571496 | 0,068201 | 0,027785 | -0,00621 |
| 314,202 | 10,87076 | 8,41589 | 1,520181 | -1,26676 | 0,653486 | 0,068201 | 0,020318 | -0,00621 |
| 315,404 | 7,655896 | 11,90891 | 1,15403 | -1,63882 | 0,735475 | 0,068201 | 0,012851 | -0,00621 |
| 316,606 | 5,321382 | 16,2965 | 0,787879 | -2,01089 | 0,817465 | 0,068201 | 0,005384 | -0,00621 |
| 318,633 | 5,689138 | 15,00182 | -0,82583 | 1,995033 | 1,198868 | 0,279673 | -0,00722 | -0,0062 |
| 319,306 | 6,933178 | 12,46935 | -1,02459 | 1,771849 | 1,386892 | 0,279673 | -0,01139 | -0,0062 |
| 319,978 | 8,444477 | 10,23696 | -1,22336 | 1,548666 | 1,574916 | 0,279673 | -0,01555 | -0,0062 |
| 320,650 | 10,22304 | 8,304673 | -1,42212 | 1,325482 | 1,76294 | 0,279673 | -0,01972 | -0,0062 |
| 327,570 | 6,221698 | 12,61253 | 1,050465 | -1,77883 | 1,502431 | -0,18456 | -0,09813 | -0,01467 |
| 333,162 | 11,28485 | 7,111054 | -1,68426 | 1,186941 | 1,910696 | 0,249876 | -0,07023 | 0,015046 |
| 338,754 | 8,055339 | 10,03445 | 1,304534 | -1,52315 | 1,662851 | -0,21512 | -0,01543 | 0,006295 |
| 344,240 | 8,566908 | 9,469682 | -1,37702 | 1,469991 | 1,70529 | 0,224741 | 0,018315 | 0,005978 |
| 349,832 | 10,62691 | 7,60044 | 1,621676 | -1,2536 | 1,862192 | -0,24302 | 0,073598 | 0,014938 |
| 355,424 | 6,646315 | 11,92804 | -1,11432 | 1,714147 | 1,538571 | 0,191618 | 0,095055 | -0,01477 |
| 361,016 | 13,35133 | 5,842571 | 1,87225 | -0,99033 | 2,054311 | -0,27079 | 0,026127 | -0,00616 |
| 366,608 | 5,110347 | 14,78798 | -0,85752 | 1,967075 | 1,399283 | 0,162578 | -0,00844 | -0,00608 |
| 372,200 | 16,42712 | 4,524347 | 2,136779 | -0,73518 | 2,276319 | -0,30264 | -0,05025 | -0,01504 |
| 377,718 | 3,902535 | 18,35133 | -0,56657 | 2,224018 | 1,275245 | 0,146739 | -0,11901 | 0,014573 |
| 383,025 | 19,44257 | 3,684515 | -2,36076 | 0,506758 | 2,48697 | 0,30374 | -0,0401 | 0,015062 |
| 388,779 | 3,928403 | 18,2378 | 0,574995 | -2,21931 | 1,281186 | -0,14653 | -0,00292 | 0,00615 |
| 394,320 | 16,43363 | 4,521935 | -2,13361 | 0,733713 | 2,285086 | 0,303228 | 0,031113 | 0,006062 |
| 399,912 | 5,110463 | 14,79568 | 0,858539 | -1,9711 | 1,403308 | -0,16397 | 0,106555 | 0,014767 |
| 405,504 | 13,35348 | 5,84444 | -1,86943 | 0,989866 | 2,055178 | 0,269908 | 0,061898 | -0,01495 |
| 411,096 | 6,646528 | 11,91888 | 1,115633 | -1,7156 | 1,536927 | -0,19236 | 0,013263 | -0,00606 |
| 416,688 | 10,63153 | 7,595177 | -1,61969 | 1,251375 | 1,856046 | 0,241489 | -0,02126 | -0,00618 |
| 422,280 | 8,565876 | 9,473059 | 1,378579 | -1,47264 | 1,699304 | -0,22399 | -0,08354 | -0,01492 |
| 427,766 | 8,053451 | 10,04513 | -1,30298 | 1,522078 | 1,661054 | 0,215291 | -0,08671 | 0,014674 |
| 434,0293 | 9,880338 | 8,619087 | 1,390153 | -1,36732 | 1,735901 | -0,28078 | -0,01867 | 0,006253 |
| 434,702 | 8,145289 | 10,60806 | 1,190612 | -1,59115 | 1,54713 | -0,28078 | -0,01447 | 0,006253 |
| 435,374 | 6,678545 | 12,898 | 0,99107 | -1,81498 | 1,358359 | -0,28078 | -0,01026 | 0,006253 |
| 436,046 | 5,480103 | 15,4889 | 0,791529 | -2,03881 | 1,169588 | -0,28078 | -0,00606 | 0,006253 |
| 438,227 | 5,749168 | 15,23887 | -0,86745 | 1,925388 | 0,801424 | -0,06858 | 0,007491 | 0,006155 |
| 439,429 | 8,275353 | 11,05598 | -1,2339 | 1,554049 | 0,718975 | -0,06858 | 0,01489 | 0,006155 |
| 440,631 | 11,68261 | 7,765912 | -1,60034 | 1,182711 | 0,636527 | -0,06858 | 0,02229 | 0,006155 |
| 441,833 | 15,97093 | 5,368676 | -1,96679 | 0,811372 | 0,554078 | -0,06858 | 0,029689 | 0,006155 |
| 445,318 | 14,62265 | 6,680176 | 1,281315 | -0,94614 | 0,151968 | -0,1024 | 0,067291 | 0,013289 |
| 450,930 | 13,9902 | 7,043125 | 1,380583 | 0,076427 | -0,00185 | -4,8E-06 | 0,072058 | -0,00301 |
| 453,612 | 8,078319 | 7,660647 | 0,823413 | -0,30664 | -0,00187 | -4,8E-06 | 0,063982 | -0,00301 |
| 456,294 | 5,155487 | 10,33323 | 0,266242 | -0,68971 | -0,00188 | -4,8E-06 | 0,055907 | -0,00301 |
| 458,977 | 5,221702 | 15,06086 | -0,29093 | -1,07279 | -0,00189 | -4,8E-06 | 0,047831 | -0,00301 |
| 461,659 | 8,276965 | 21,84355 | -0,8481 | -1,45586 | -0,0019 | -4,8E-06 | 0,039755 | -0,00301 |
| 466,333 | 22,15036 | 14,43941 | 6,97624 | -2,90618 | -0,00217 | 0,000838 | 0,005572 | -0,00618 |
| 469,072 | 10,42278 | 11,63406 | 0,9482 | 1,141475 | -0,00099 | 0,000339 | -0,01281 | -0,00682 |
| 471,259 | 7,146836 | 7,588042 | 0,549717 | 0,708558 | -0,00025 | 0,000339 | -0,02772 | -0,00682 |
| 473,446 | 5,613854 | 5,435599 | 0,151235 | 0,275641 | 0,000493 | 0,000339 | -0,04262 | -0,00682 |
| 477,369 | 7,231487 | 6,319451 | -0,56357 | -0,50094 | 0,001822 | 0,000339 | -0,06936 | -0,00682 |
| 480,084 | 11,63415 | 10,49807 | -1,05821 | -1,03831 | 0,002741 | 0,000339 | -0,08786 | -0,00682 |
| 482,798 | 18,7224 | 17,59436 | -1,55284 | -1,57569 | 0,00366 | 0,000339 | -0,10636 | -0,00682 |
| 485,513 | 28,49623 | 27,6083 | -2,04748 | -2,11307 | 0,004579 | 0,000339 | -0,12486 | -0,00682 |
| 488,635 | 43,05597 | 42,70611 | -2,6163 | -2,69986 | 0,005636 | 0,000339 | -0,13591 | 0,017889 |
| 489,767 | 49,2144 | 49,03023 | -2,82261 | -2,8958 | 0,00602 | 0,000339 | -0,10156 | 0,034353 |
| 490,449 | 53,14455 | 53,06439 | -2,94673 | -3,0262 | 0,00625 | 0,000339 | -0,07816 | 0,034353 |
| 491,130 | 57,24381 | 57,2762 | -3,07085 | -3,15661 | 0,006481 | 0,000339 | -0,05476 | 0,034353 |
| 492,262 | 64,43161 | 64,65298 | -3,27716 | -3,34186 | 0,006864 | 0,000339 | -0,02038 | 0,017965 |
| 495,957 | 32,58452 | 161,3086 | -0,69645 | 20,22998 | 0,004837 | 7,84E-05 | -0,04128 | 0,001318 |
| 497,910 | 44,43699 | 44,65578 | 8,548869 | 8,587411 | 0,005599 | -0,0011 | -0,02997 | -0,00156 |
| 498,180 | 39,94213 | 40,1406 | 8,098738 | 8,135492 | 0,005301 | -0,0011 | -0,03039 | -0,00156 |
| 498,450 | 35,69035 | 35,86945 | 7,648607 | 7,683573 | 0,005002 | -0,0011 | -0,03081 | -0,00156 |
| 498,720 | 31,68164 | 31,84234 | 7,198477 | 7,231655 | 0,004704 | -0,0011 | -0,03123 | -0,00156 |
| 498,990 | 27,916 | 28,05926 | 6,748346 | 6,779736 | 0,004406 | -0,0011 | -0,03165 | -0,00156 |
| 499,260 | 24,39342 | 24,52022 | 6,298215 | 6,327818 | 0,004108 | -0,0011 | -0,03207 | -0,00156 |
| 499,530 | 21,11392 | 21,22522 | 5,848085 | 5,875899 | 0,00381 | -0,0011 | -0,0325 | -0,00156 |
| 499,800 | 18,07749 | 18,17425 | 5,397954 | 5,423981 | 0,003511 | -0,0011 | -0,03292 | -0,00156 |
| 500,070 | 15,28413 | 15,36732 | 4,947823 | 4,972062 | 0,003213 | -0,0011 | -0,03334 | -0,00156 |
| 500,340 | 12,73384 | 12,80443 | 4,497692 | 4,520143 | 0,002915 | -0,0011 | -0,03376 | -0,00156 |
| 500,610 | 10,42663 | 10,48557 | 4,047562 | 4,068225 | 0,002617 | -0,0011 | -0,03418 | -0,00156 |
| 500,880 | 8,362477 | 8,410744 | 3,597431 | 3,616306 | 0,002319 | -0,0011 | -0,0346 | -0,00156 |
| 501,150 | 6,5414 | 6,579956 | 3,1473 | 3,164388 | 0,002021 | -0,0011 | -0,03502 | -0,00156 |
| 501,420 | 4,963393 | 4,993205 | 2,69717 | 2,712469 | 0,001722 | -0,0011 | -0,03544 | -0,00156 |
| 501,690 | 3,628457 | 3,65049 | 2,247039 | 2,260551 | 0,001424 | -0,0011 | -0,03586 | -0,00156 |
| 501,960 | 2,536591 | 2,55181 | 1,796908 | 1,808632 | 0,001126 | -0,0011 | -0,03628 | -0,00156 |
| 502,230 | 1,687796 | 1,697167 | 1,346778 | 1,356713 | 0,000828 | -0,0011 | -0,0367 | -0,00156 |
| 502,500 | 1,082071 | 1,08656 | 0,896647 | 0,904795 | 0,00053 | -0,0011 | -0,03712 | -0,00156 |
| 502,770 | 0,719417 | 0,719989 | 0,446516 | 0,452876 | 0,000231 | -0,0011 | -0,03754 | -0,00156 |
| 503,040 | 0,599834 | 0,597453 | -0,00361 | 0,000958 | -6,7E-05 | -0,0011 | -0,03796 | -0,00156 |

Таблица 6. Основные проектные параметры системы стохастического охлаждения коллайдера NICA

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Метод охлаждения | Фильтр | |
| Полоса частот пропускания, ГГц | 0,7 – 3,2 | |
| Расстояние по пучку от пикапа до кикера, м | 179,8 | |
| Энергия ионов 197Au79+ , ГэВ/н | 3,0 | 4,5 |
| Слип фактор от пикапа до кикера | 0.0294 | 0.0027 |
| Слип-фактор кольца | 0.0362 | 0.0095 |
| Импеданс пикапа/кикера, Ом | 200/800 | |
| Коэффициент усиления, дБ | 75 – 79 | |
| Максимальная мощность в кикере, Вт | 3×200 | |
| Температура пикапа/шума, K | 300/40 | |

Таблица 7. Основные проектные параметры коллайдера NICA

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Периметр кольца, м | 503,04 | | |
| Количество сгустков | 22 | | |
| Ср. кв. длина сгустка, м | 0,6 | | |
| β-функция в точке встречи, м | 0,6 | | |
| Бетатронные частоты, Qx/Qy | 9,44/9,44 | | |
| Хроматичности, Q’x/Q’y | -33/-28 | | |
| Аксептанс кольца, π мм∙мрад | 40 | | |
| Импульсный аксептанс | ±0,010 | | |
| Фактор критической энергии | 7,088 | | |
| Энергия ионов 197Au79+ , ГэВ/н | 1,0 | 3,0 | 4,5 |
| Количество ионов в сгустке | 2,0×108 | 2,8×109 | 2,7×109 |
| Светимость, см−2 с−1 | 0,6×1025 | 1,0×1027 | 1,0×1027 |