



Вячеслав Ключин (НИИЯФ МГУ)

Вклад неоднородности магнитного поля в разрешение по поперечному импульсу заряженных частиц

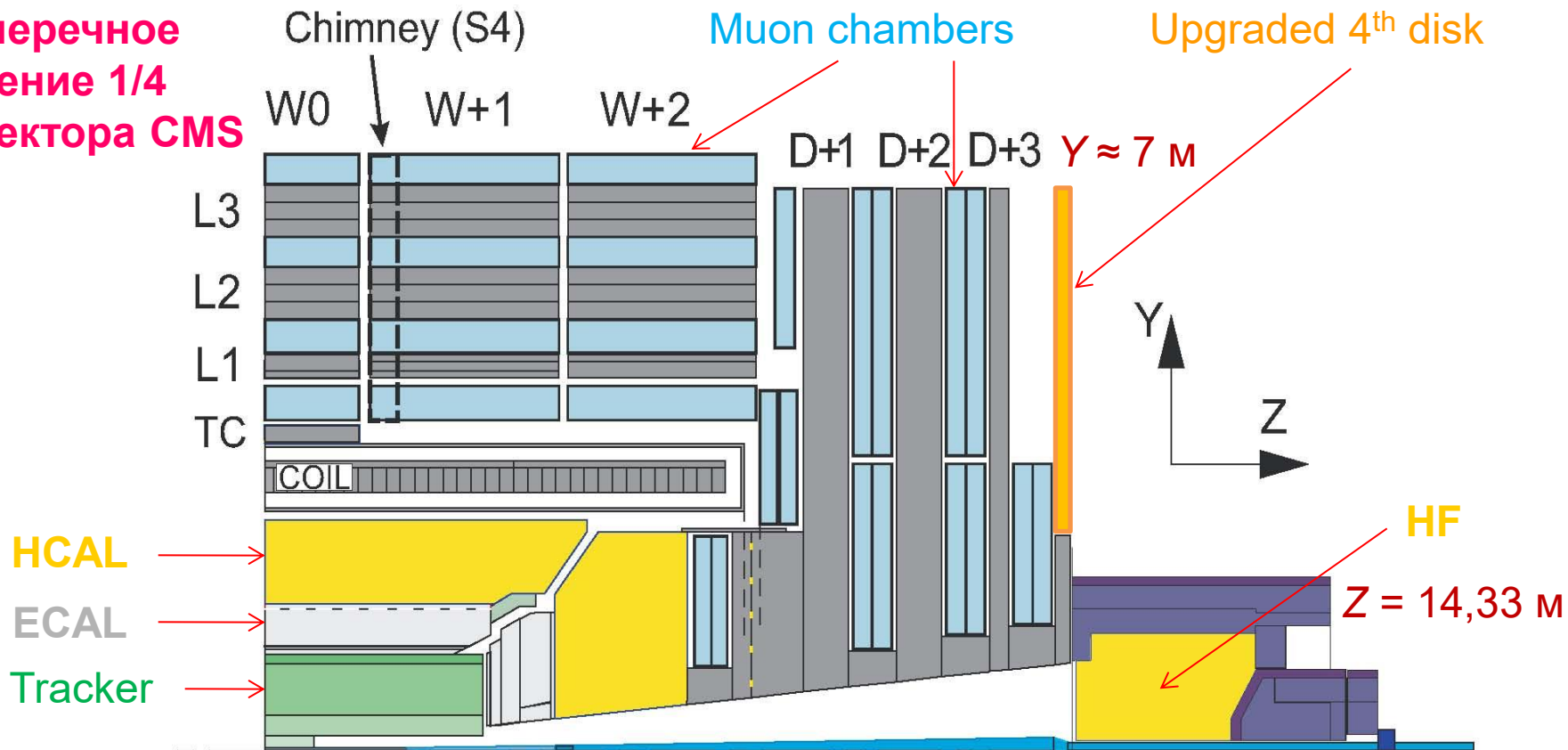
*«Физика частиц при средних и высоких энергиях»
НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ, г. Протвино*

5 июня 2026

План доклада

- Определение **двойных интегралов магнитного поля**.
- Краткое описание магнитных систем детекторов **CMS, FCC-hh** и **MPD**.
- Распределение плотности магнитной индукции в детекторах **CMS, FCC-hh** и **MPD**.
- Поведение величины **полной плотности магнитного потока** и угла между вектором **магнитной индукции** и вектором начального **импульса** заряженной частицы в зависимости от длины траектории частицы и **псевдобыстроты**.
- Поведение **двойных интегралов магнитного поля** вдоль траектории заряженной частицы в зависимости от **псевдобыстроты**.
- Оценка вклада **неоднородности магнитного поля** в разрешение по **поперечному импульсу** заряженных частиц.
- **Заключение**.

Поперечное сечение 1/4 детектора CMS



Superconducting coils inside the cryostats – in dark grey;

Inner tracker – in green;

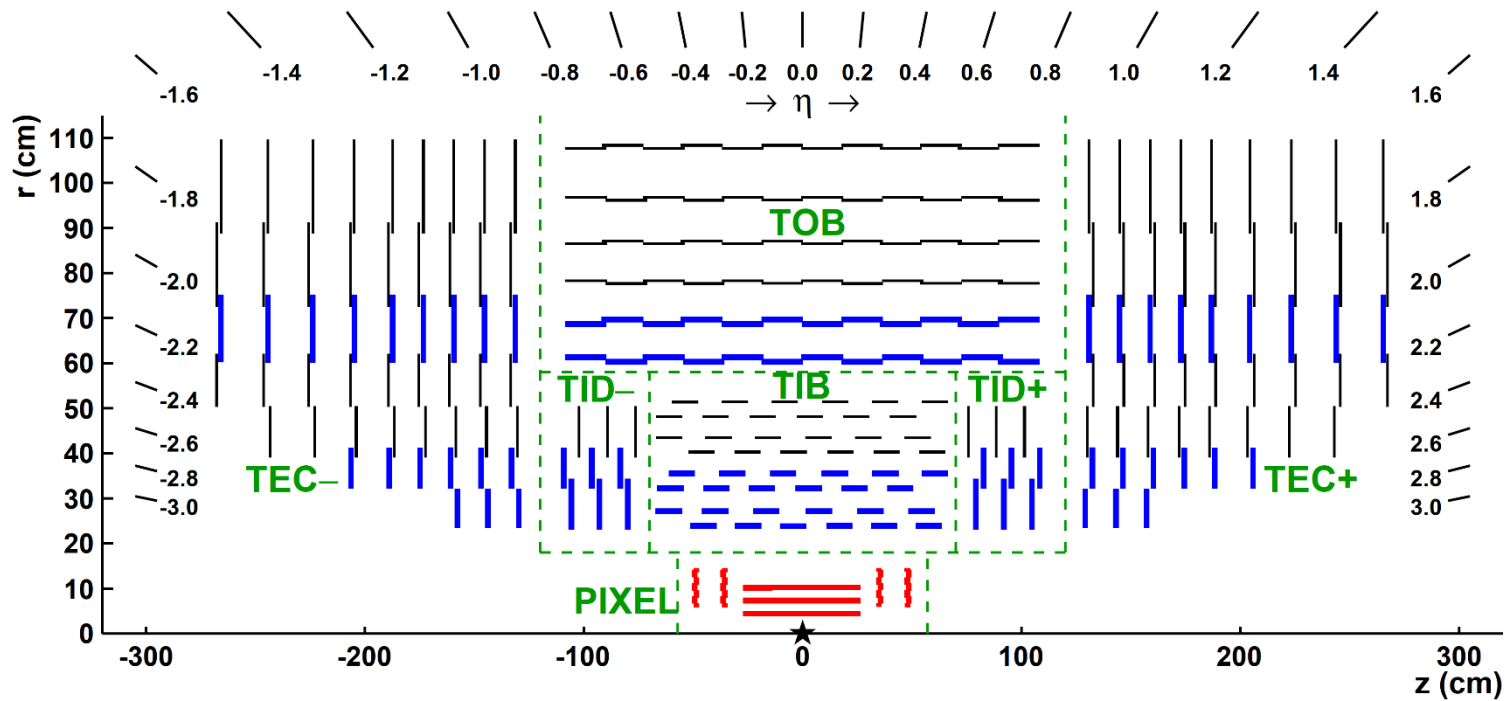
Electromagnetic calorimeter – in light grey;

Hadronic calorimeter – in yellow;

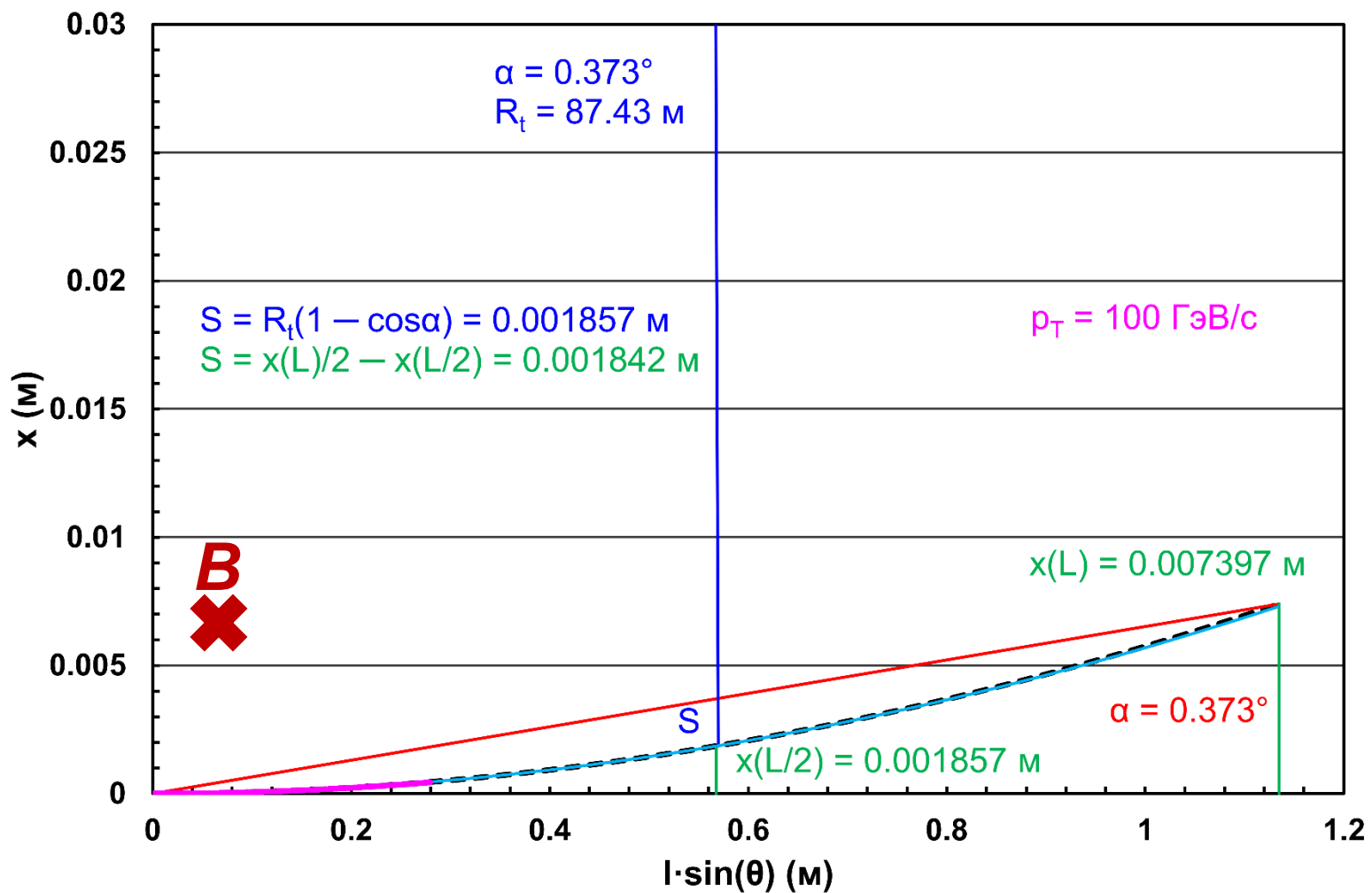
Muon chambers – in light blue;

Magnet yoke – in dark grey;

Radiation protection shield – in violet.

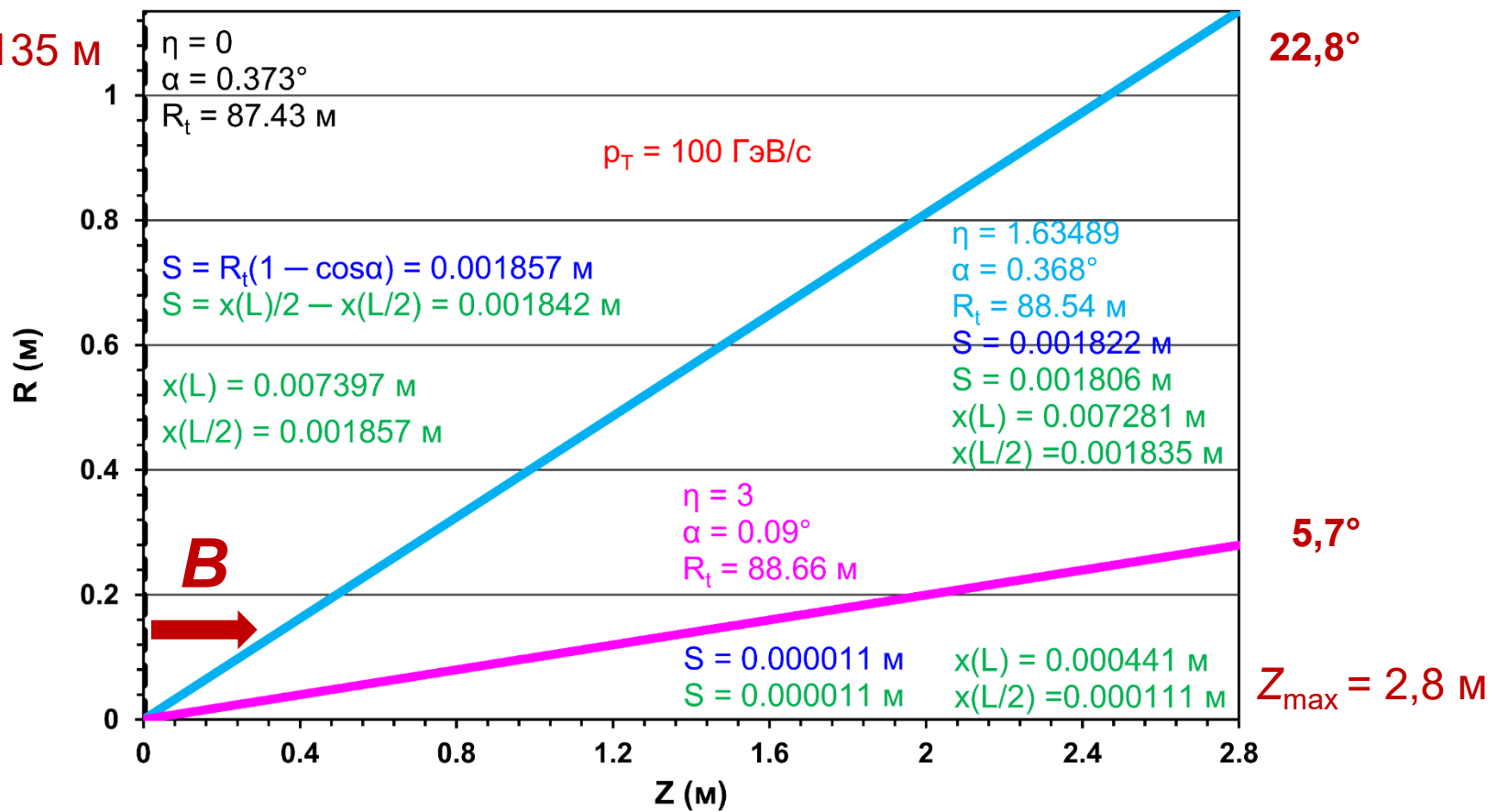


Схематическое поперечное сечение половины трекового детектора CMS в RZ -плоскости. Зеленые пунктирные линии разграничивают подсистемы детектора. Тонкими черными линиями показаны двумерные полосковые модули, толстыми синими линиями – трехмерные, состоящие из двух спаренных полосковых модулей, в которых один модуль повернут под углом. Пиксельные модули, обозначенные красными линиями, также обеспечивают трехмерные отсчёты. В пределах каждого слоя модули смещены по R или Z относительно соседних модулей, перекрывая друг друга и обеспечивая сплошной акцептанс. По краям обозначена псевдобыстрота $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$, где θ – полярный угол.



Траектории положительно заряженных частиц с $p_T = 100 \text{ ГэВ/с}$ в плоскости, поперечной оси пучков взаимодействующих частиц, при значениях псевдобыстроты частиц $\eta = 0$ (черный пунктир), 1,63489 (голубая линия) и 3 (пурпурная линия). Здесь R_t — радиус траектории, S — расстояние от центра дуги до центра ее основания (сагитта).

$$R_{\max} = 1,135 \text{ м}$$



Проекция траекторий заряженных частиц с $p_T = 100 \text{ ГэВ/с}$, испущенных в радиальной плоскости RZ из точки взаимодействия пучков протонов. Здесь: R_t – радиус проекции траектории частицы на плоскость XY ; S – сагитта проекции траектории частицы в плоскости XY ; α – конечный угол поворота частицы в плоскости XY ; x – поперечное отклонение частицы в плоскости XY ; L – полная длина проекции трека на плоскость RZ . Сагитта S рассчитывается по формуле $S = R_t(1 - \cos \alpha)$ или по поперечным отклонениям x .

Определение двойных интегралов магнитного поля

Рассмотрим траекторию **заряженной частицы**, испущенной под углом θ к оси пучков частиц Z из номинальной точки столкновения частиц пучков. Для малого шага dl вдоль траектории движения частицы в **идеальном соленоиде с однородным магнитным полем**, направленным по оси Z , изменение $d\alpha$ угла поворота частицы лежит в плоскости, поперечной пучкам частиц, и определяется выражением

$$d\alpha = \frac{0.3}{p_T} B dl \sin\theta,$$

где **длина траектории** l измеряется в **метрах**, **поперечный импульс** частицы p_T измеряется в **ГэВ/с**, а величина вектора **плотности магнитного потока** B измеряется в **Тл**. В случае **неоднородного магнитного поля** траектория частицы заворачивается в направлении, определяемом векторным произведением $dl \times B$. На длине l угол поворота частицы α по отношению к RZ -плоскости, определяемой вектором начального **импульса** частицы и осью пучков частиц, составляет

$$\alpha(l) = \frac{0.3}{p_T} \int_0^l B \sin\theta_{(dl, B)} dl,$$

где **полярный угол** θ является углом между вектором начального **импульса** частицы и вектором **плотности магнитного потока** B .

Определение поперечного отклонения траектории

Поперечное отклонение траектории частицы x определяется интегрированием предыдущего выражения по $dr = dl \sin\theta$, где r — радиус в плоскости, поперечной оси пучков частиц:

$$x(l) = \frac{0.3}{p_T} \int_0^{l \sin\theta} \int_0^{r/\sin\theta} B \sin\theta_{(dl,B)} dl dr.$$

Для идеального соленоида поперечное отклонение частицы $x(l)$ пропорционально l^2 . Относительная точность измерения поперечного импульса δ в идеальном соленоиде выражается формулой Глюкштерна:

$$\delta = \frac{dp_T}{p_T} \approx \frac{\sigma p_T}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}},$$

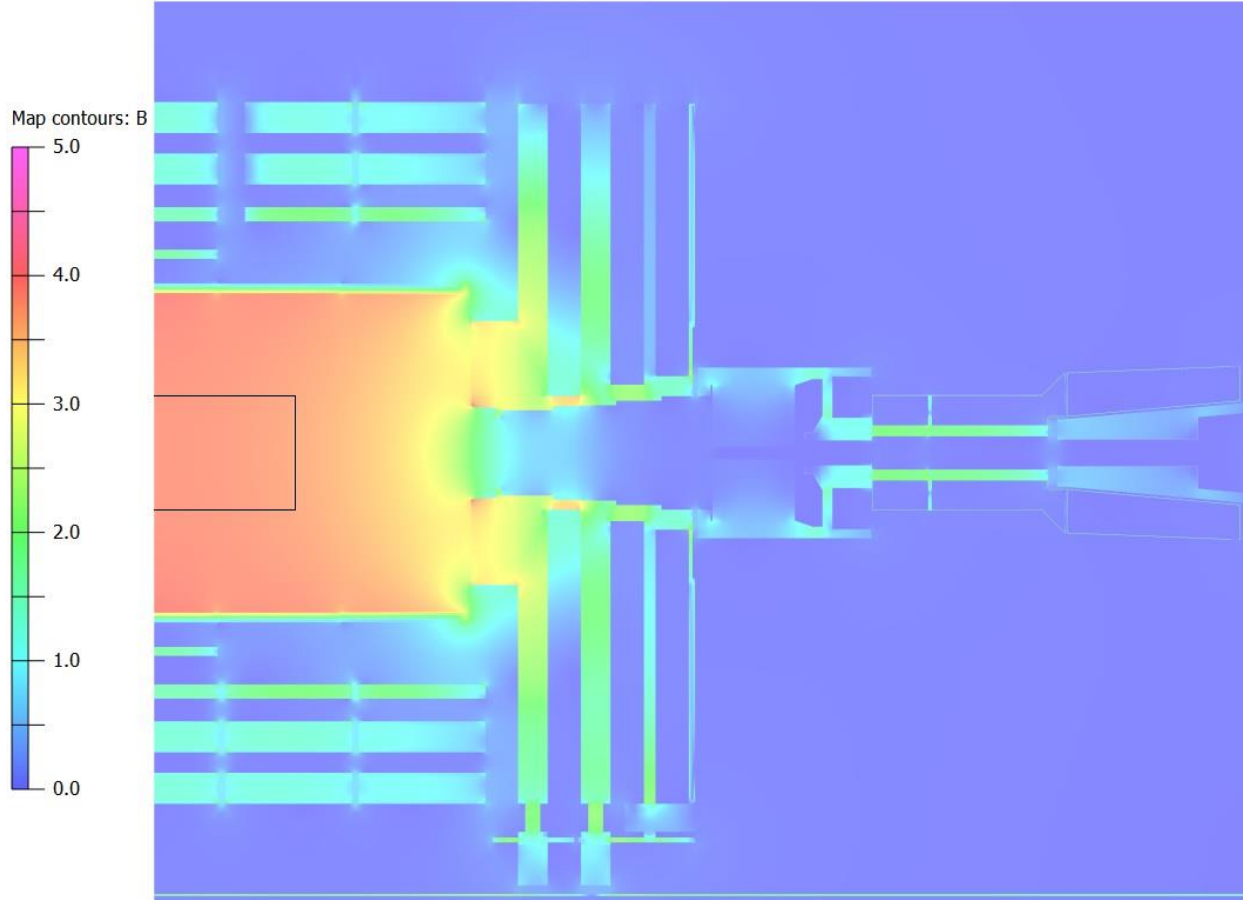
выраженной для однородного поля соленоида B [Тл], N равноудаленных друг от друга плоскостей (слоёв) детектора, пространственного разрешения σ [м] в плоскости (слоёв) детектора и длины трека L [м] в объёме трекового детектора. В неоднородном магнитном поле член BL^2 следует заменить двойным интегралом магнитного поля:

$$I_2 = \int_0^{l \sin\theta} \int_0^{r/\sin\theta} B \sin\theta_{(dl,B)} dl dr.$$

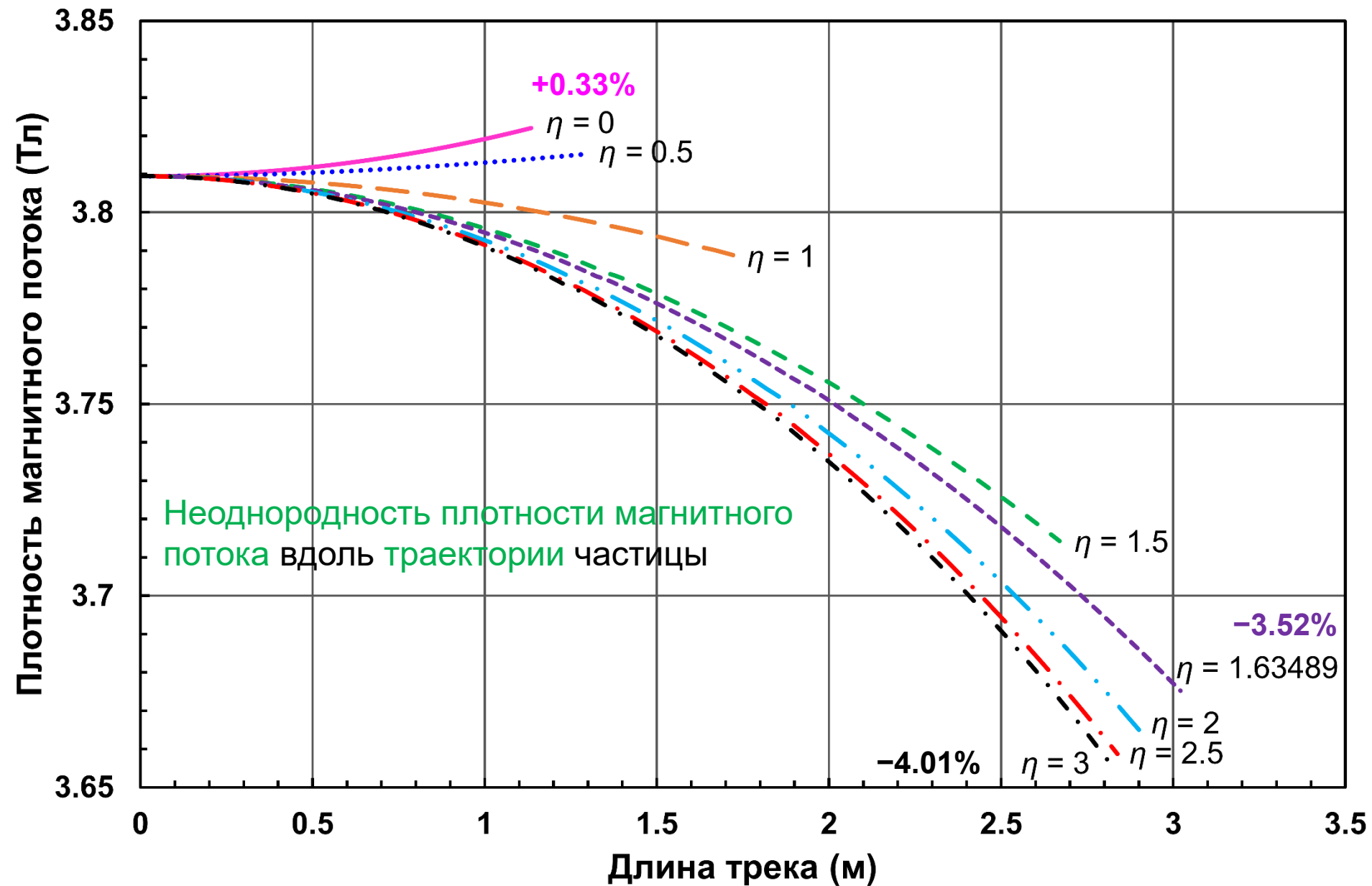
Вклад неоднородности магнитного поля в разрешение по поперечному импульсу

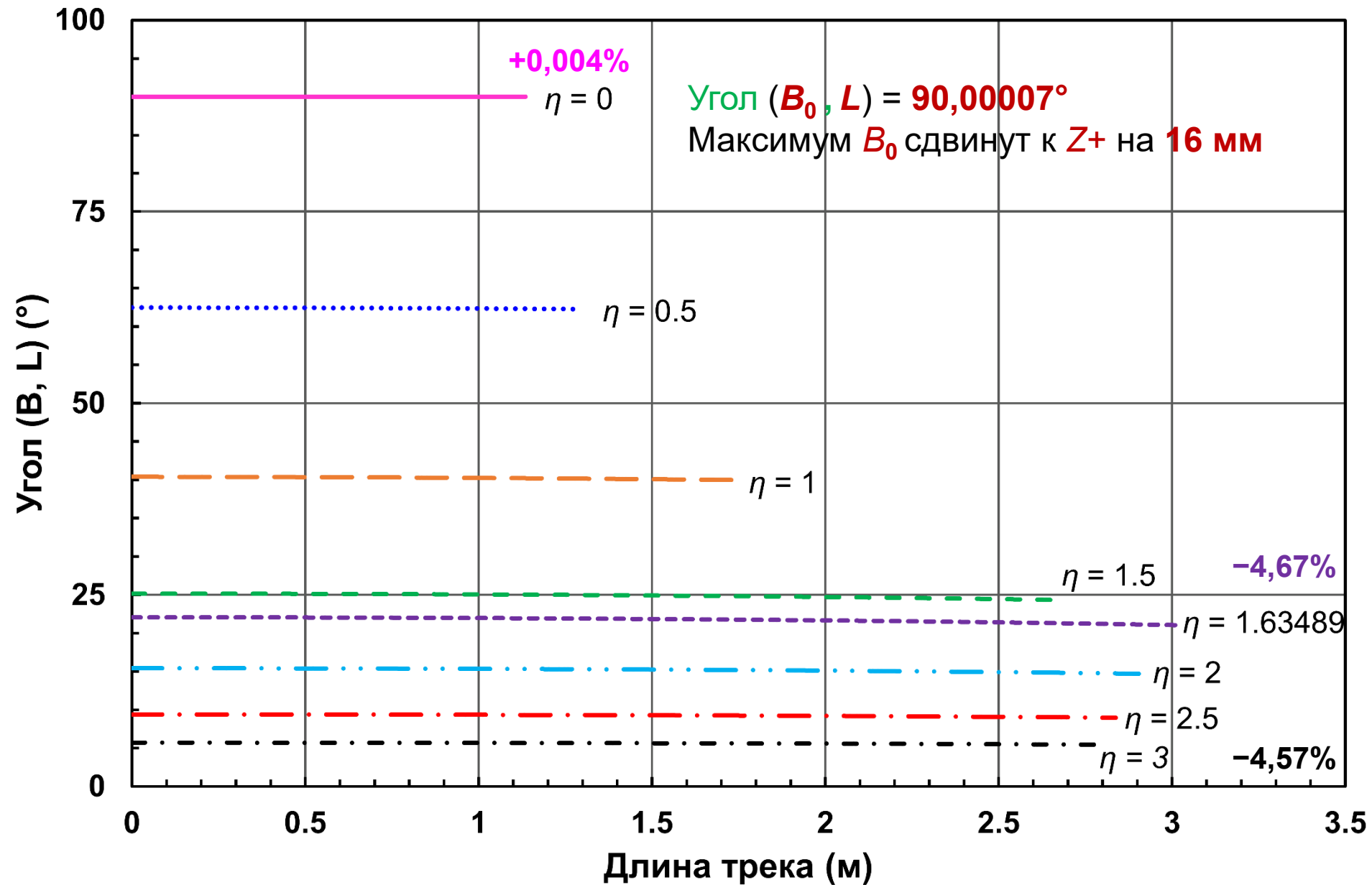
Деградация относительной точности измерения поперечного импульса δ в реальном – *inhomogeneous* (*i*) соленоиде по отношению к идеальному – *homogeneous* (*h*) определяется соотношением $(\delta_i - \delta_h) / \delta_i = 1 - R$, где $R = \delta_h / \delta_i$, или $R = x_i(L) / x_h(L)$, или $R = I_{2i} / I_{2h}$, индексы *h* и *i* обозначают однородное и неоднородное магнитное поле соответственно, а *L* является проекцией полной длины траектории частицы в объёме трековой системы на *RZ*-плоскость, что оправдано при больших поперечных импульсах. Таким образом, ухудшение разрешения $\Delta p_T / p_T$ по поперечному импульсу частицы пропорционально величине деградации $1 - R$.

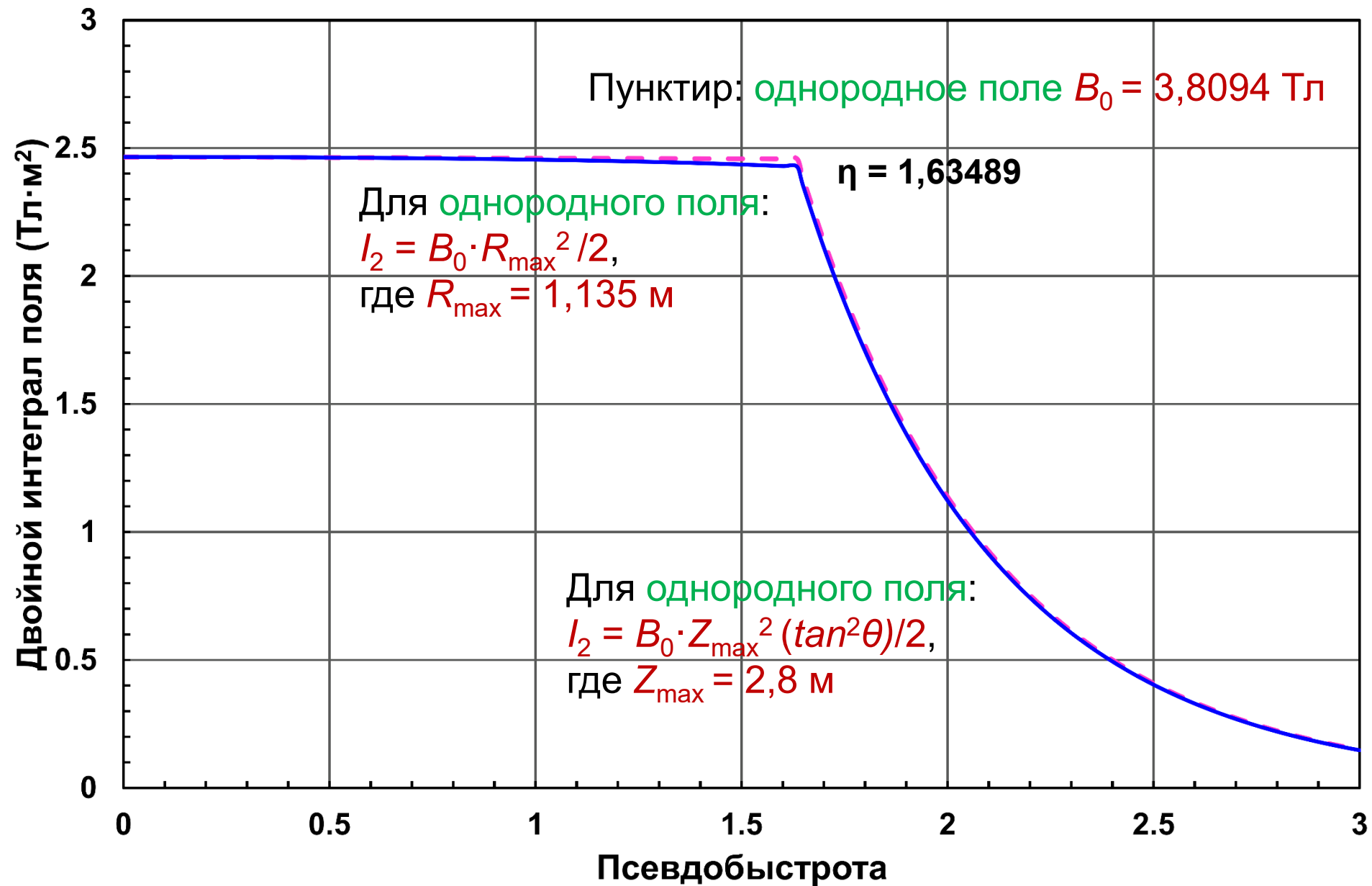
Сагитту трека частицы можно аппроксимировать выражением $x(L)/2 - x(L/2)$. Для идеального соленоида сагитта равна $x(L/2)$, поскольку $x(L) = 4x(L/2)$.

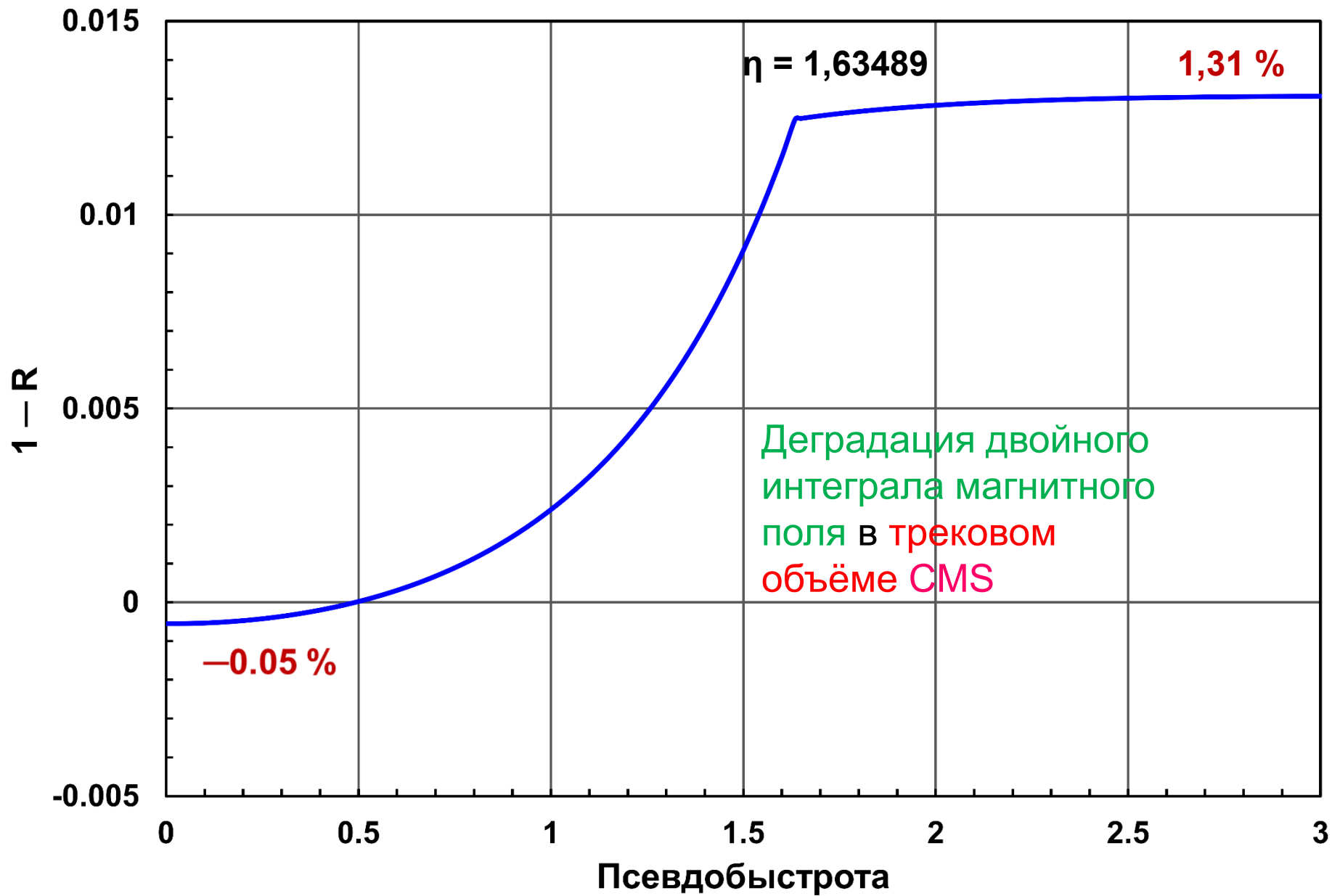


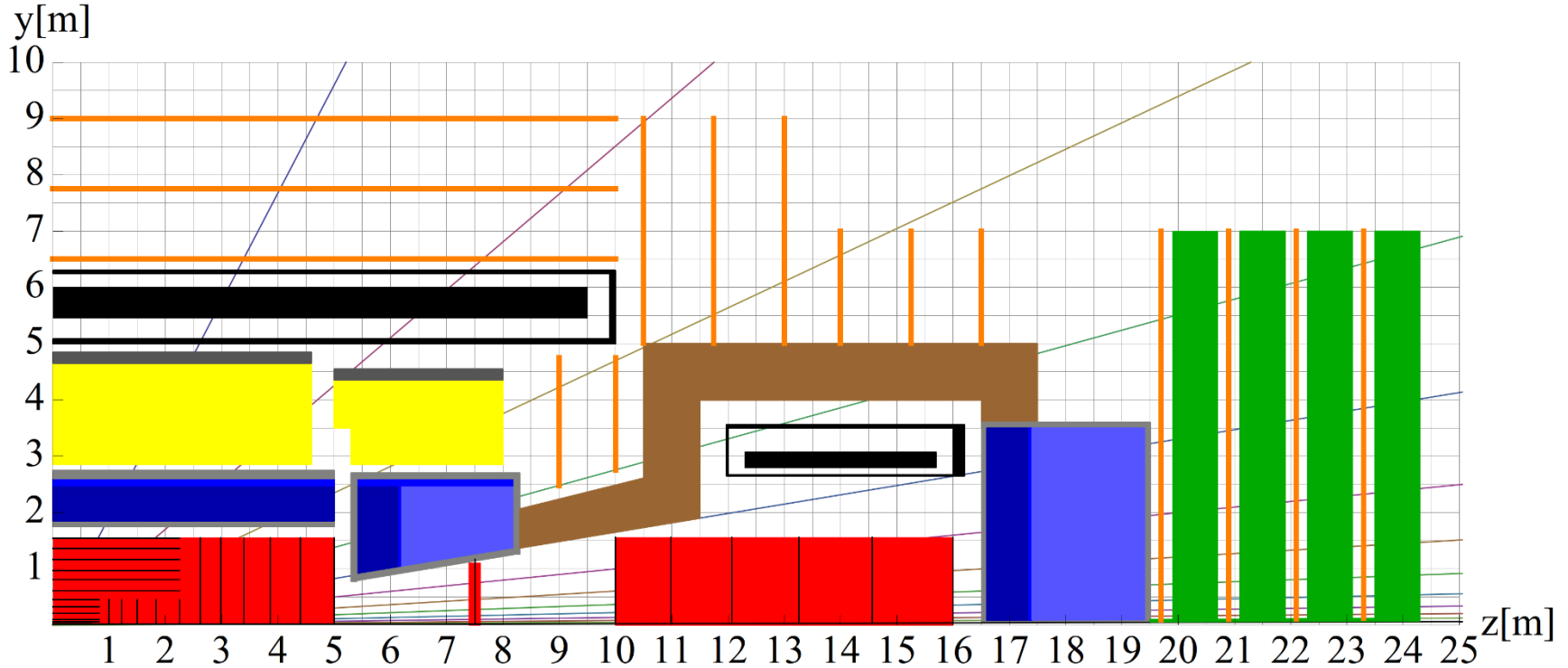
В детекторе **CMS** объём **трековой системы** представляет собой цилиндр длиной **5,6 м** и радиусом **1,135 м**. **Двойные интегралы магнитного поля** вычислены в области псевдобыстроты η от **0** до **3**, где $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$, а θ — **полярный угол** в системе координат детектора **CMS**. Значение $\eta = 1,63489$ соответствует углу квадранта **RZ-плоскости** в **трековом объёме**. **Центральная плотность** — **3,81 Тл**.



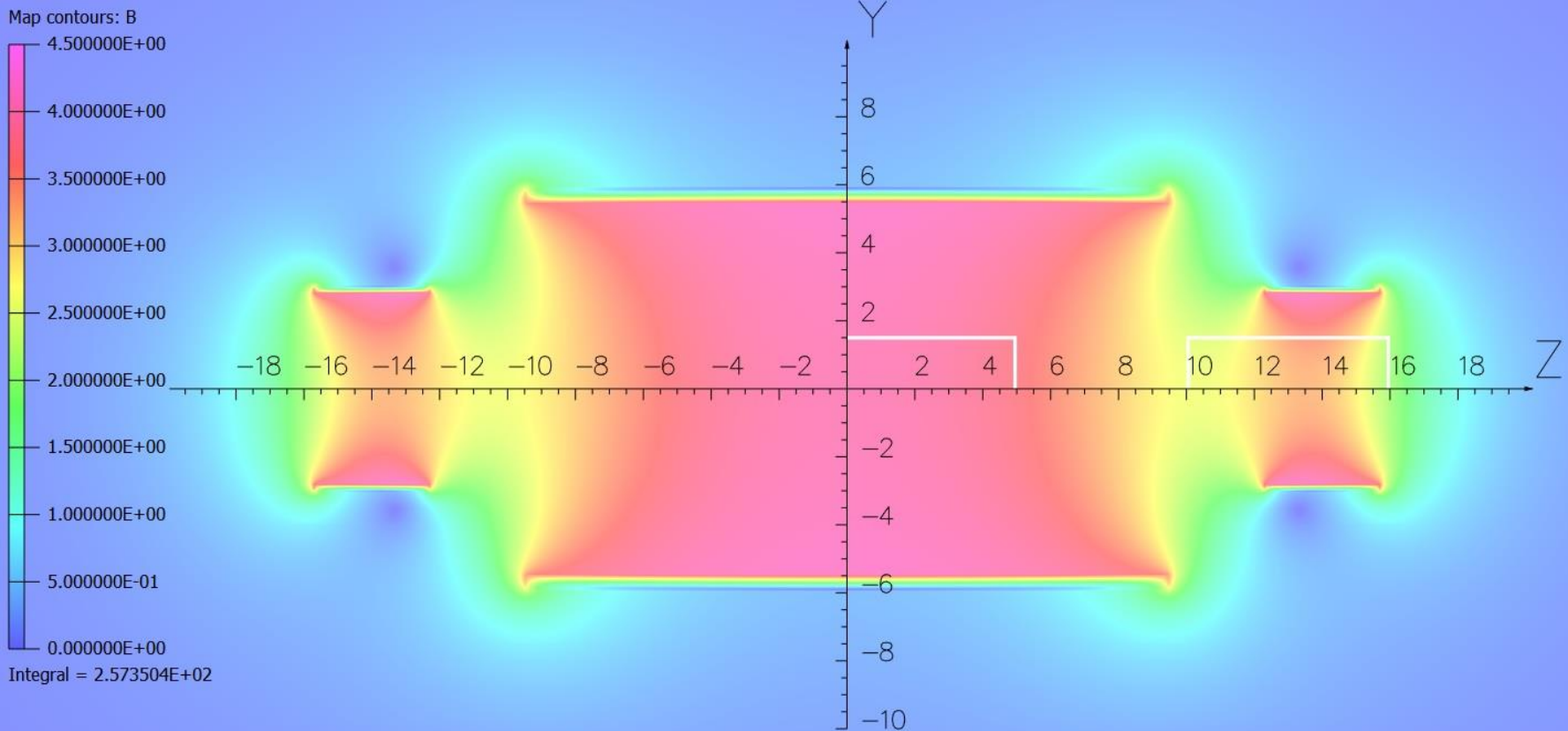




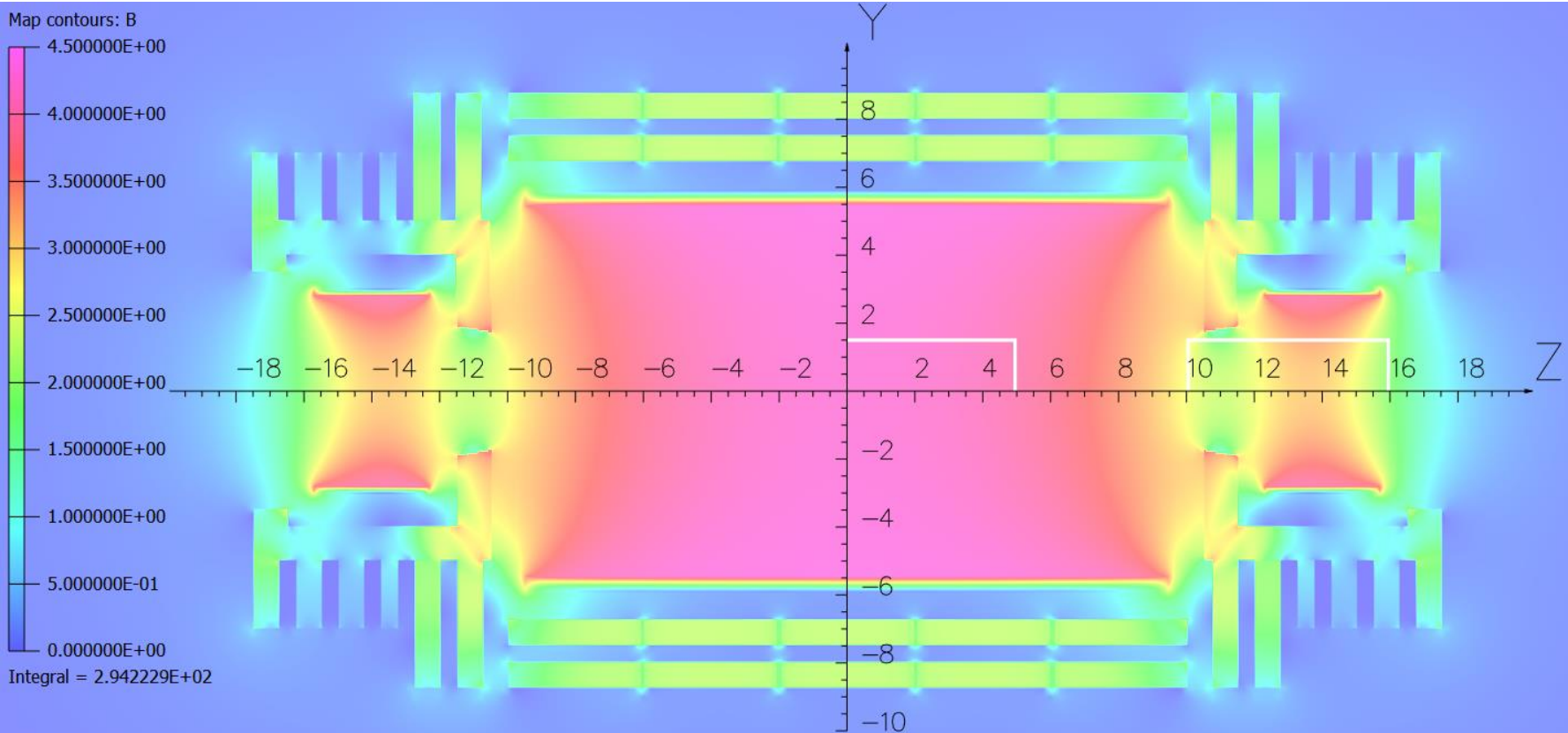




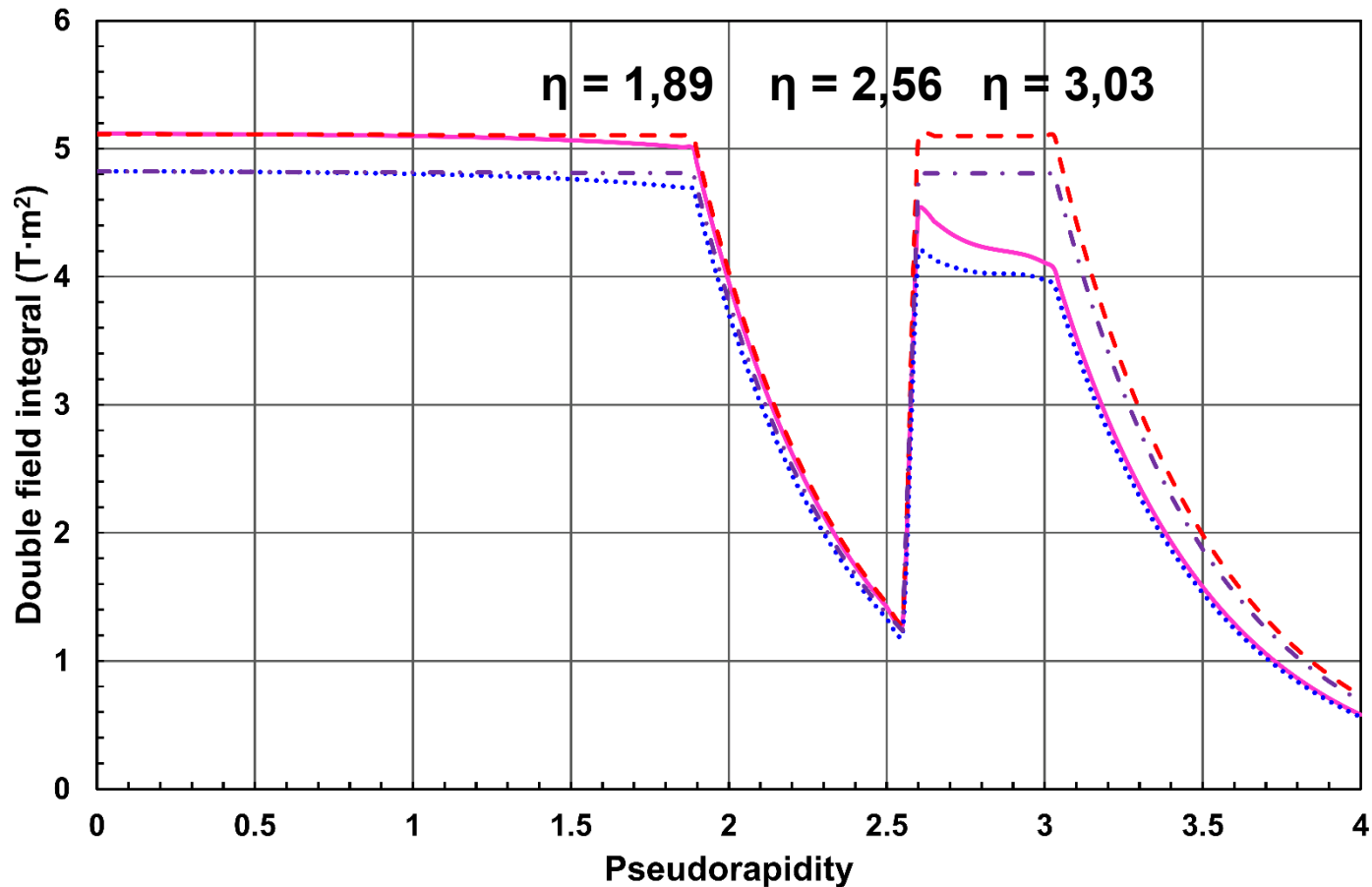
Четверть поперечного сечения детектора **FCC-hh** с **базовой магнитной системой**. Черным цветом показана четверть основной **сверхпроводящей катушки** и половина **передней катушки** в криостатах. **Коричневым** цветом показан защита от радиационного излучения, изготовленная из немагнитного материала. **Красным** цветом показана **трековая система** для регистрации заряженных частиц. **Оранжевые** линии обозначают расположение **мюонных камер**. Другими цветами обозначены **электромагнитные** и **адронные калориметры**, а также немагнитные диски **передней мюонной системы**.



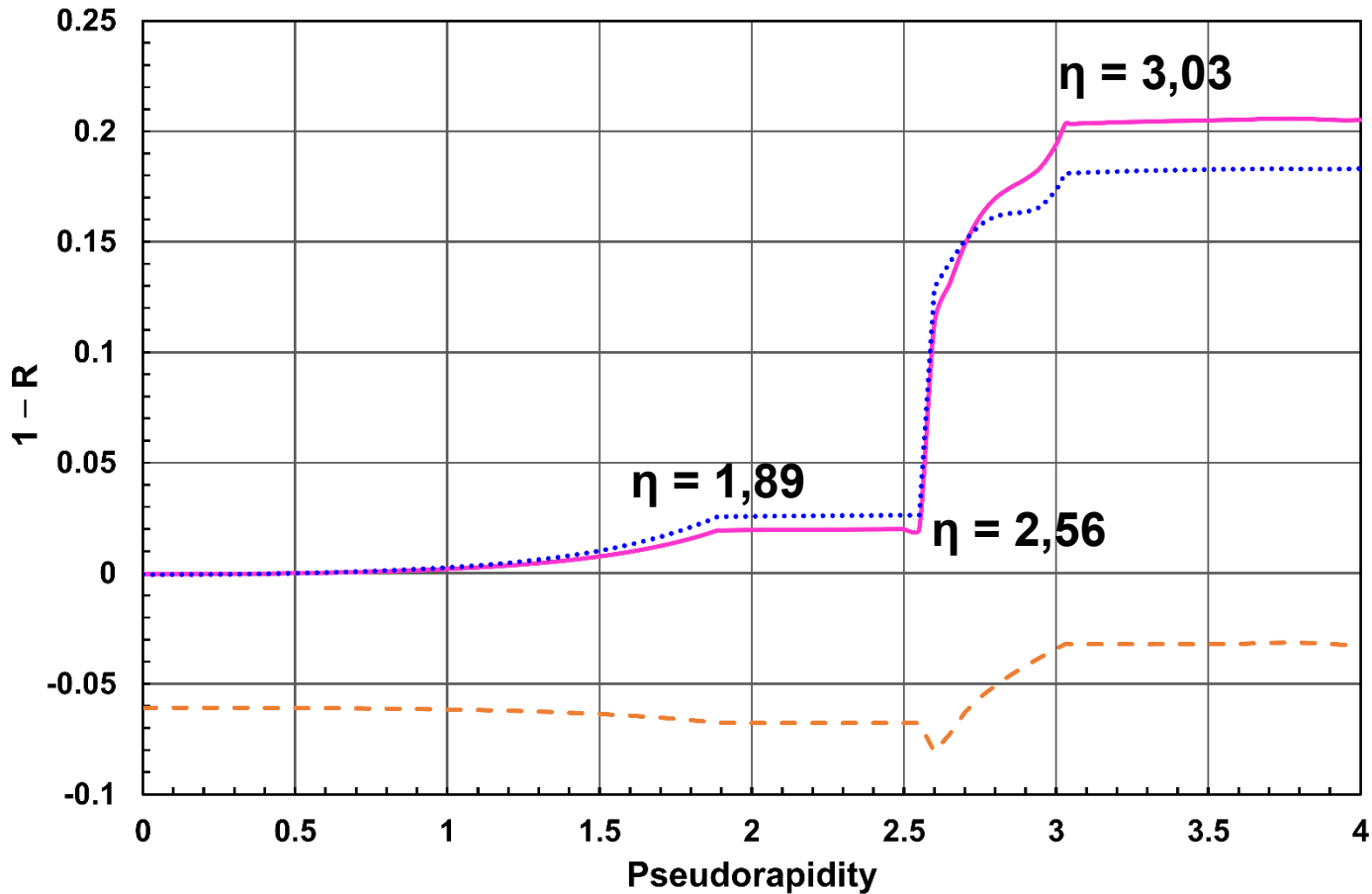
Распределение плотности магнитного потока в базовой магнитной системе детектора FCC-hh. Центральная плотность составляет 4 Тл. Трековая система радиусом 1,55 м и длиной 32 м включает в себя центральный цилиндр длиной 10 м и два боковых цилиндра длиной 6 м каждый. Плотность магнитного потока в боковых цилиндрах составляет 3,2 Тл. Деление цветовой шкалы — 0,5 Тл, минимальное и максимальное значения плотности магнитного потока составляют 0,0142 и 4,1595 Тл.



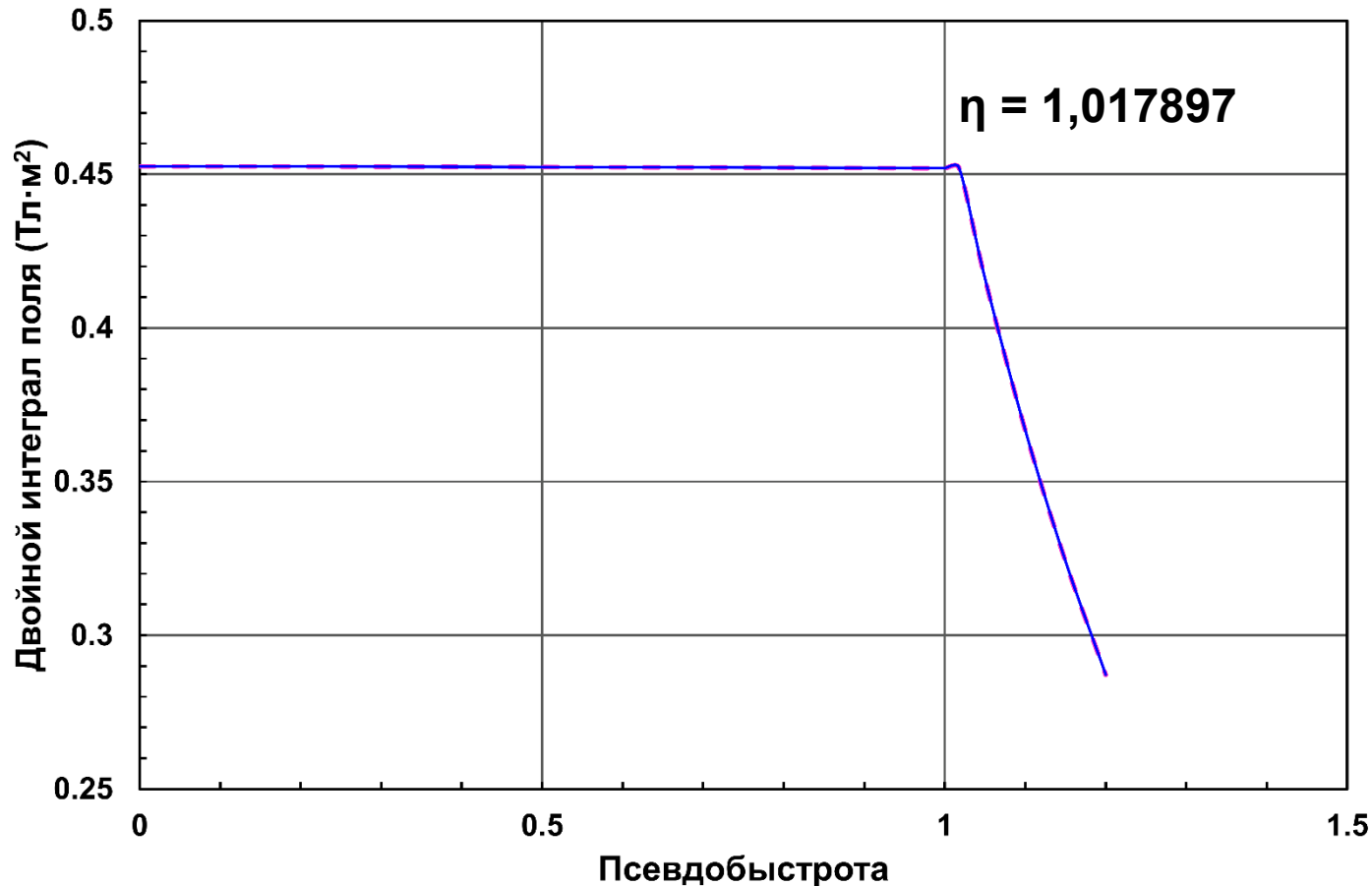
Распределение плотности магнитного потока в магнитной системе детектора FCC-hh с минимальным ярмом возвратного магнитного потока. Центральная плотность составляет 4,24 Тл. Трековая система радиусом 1,55 м и длиной 32 м включает в себя центральный цилиндр длиной 10 м и два боковых цилиндра длиной 6 м каждый. Плотность магнитного потока в боковых цилиндрах составляет 3,04 Тл. Деление цветовой шкалы — 0,5 Тл, минимальное и максимальное значения плотности магнитного потока: 0,0002 и 4,3623 Тл.



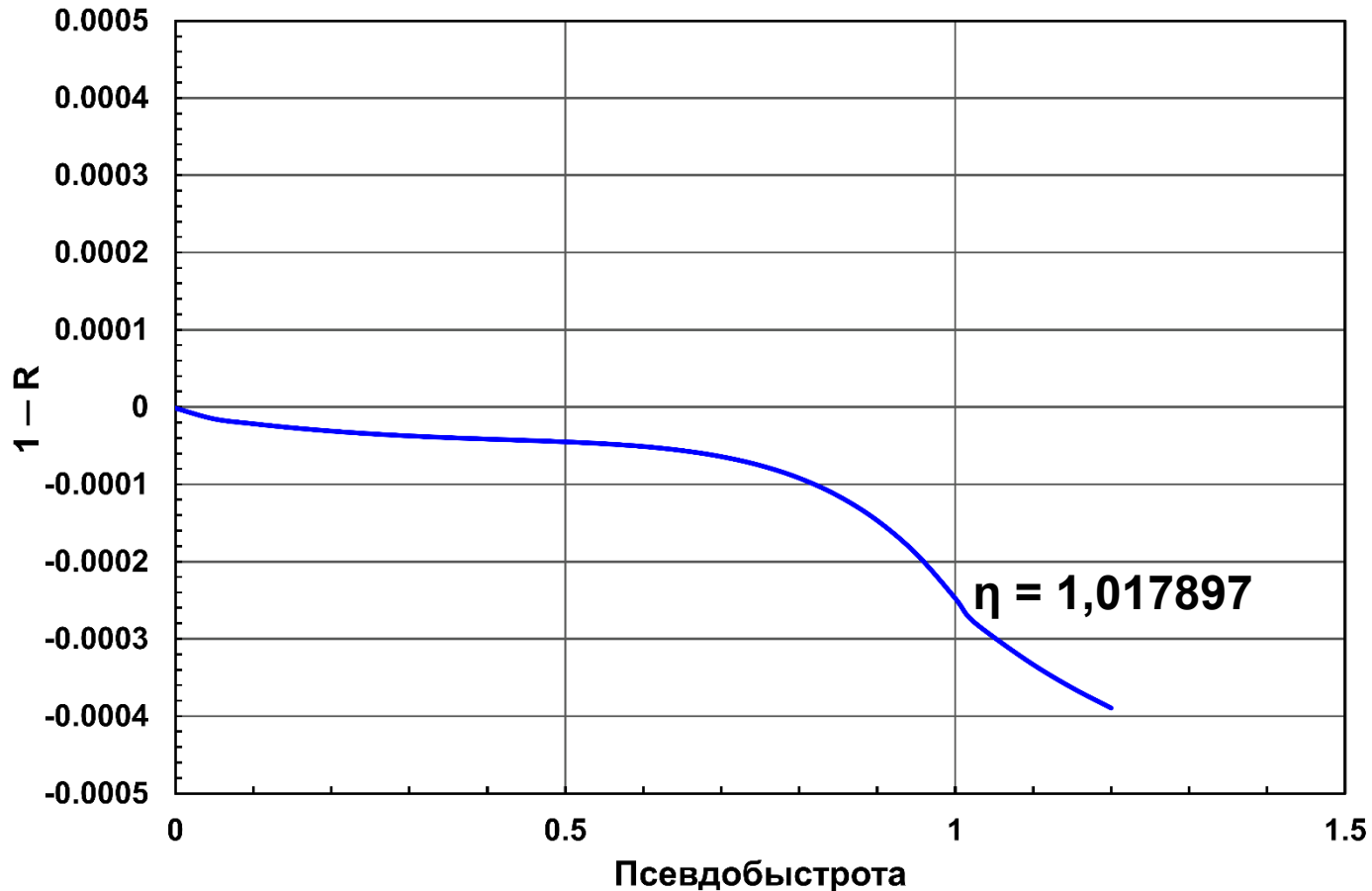
Двойные интегралы магнитного поля в вертикальной плоскости трековой системы для детектора FCS-hh с минимальным стальным ярмом (сплошная линия – интеграл неоднородного поля, пунктир – однородного поля 4,24 Тл) и для базовой магнитной системы (точки – интеграл неоднородного поля, штрих-пунктирная линия – однородного поля 4 Тл).



Деградация двойных интегралов магнитного поля в вертикальной плоскости трековой системы для детектора FCC-hh с минимальным стальным ярмом (сплошная линия) и для базовой магнитной системы (точки) в зависимости от псевдобыстроты. Пунктирная линия представляет собой деградацию двойного интеграла детектора с минимальным ярмом по отношению к детектору с базовой магнитной системой.



Двойные интегралы магнитного поля в вертикальной плоскости **трековой системы** детектора **MPD** в области $0 < R < 1,33$ м и $|Z| < 1,6$ м. **Сплошная** линия – интеграл **неоднородного поля**, **пунктир** – интеграл **однородного поля** с плотностью магнитного потока **0,50976 Тл**. Интегралы совпадают в пределах $4,7 \cdot 10^{-5} - 3,9 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, поле в области **трековой системы** детектора **MPD** является практически **однородным**.



Деградация двойных интегралов магнитного поля в вертикальной плоскости трековой системы установки МРД в области $0 < R < 1,33$ м и $|Z| < 1,6$ м. Интеграл реального неоднородного поля всегда больше интеграла однородного поля с плотностью магнитного потока $0,50976$ Тл на $4,7 \cdot 10^{-5} - 3,9 \cdot 10^{-4}$ от величины интеграла однородного поля, что свидетельствует о высоком качестве магнитного поля установки МРД.

Заключение

- Метод **двойных интегралов магнитного поля** применён к исследованию влияния **неоднородности магнитного поля** в объёме различных **трековых детекторов** на разрешение по **поперечному импульсу** заряженных частиц.
- Определяющая **вклад магнитного поля** в разрешение по **поперечному импульсу** деградация **двойного интеграла магнитного поля** в **трековом детекторе** установки **CMS** не превышает **1,31%** в интервале **псевдобыстроты** $1,63489 < |\eta| < 3$ и существенно меньше при её меньших значениях.
- В планируемом детекторе **FCC-hh** вклад **неоднородности магнитного поля** в разрешение по **поперечному импульсу** заряженных частиц не превышает **1,94%** или **2,56%** в интервале **псевдобыстроты** $|\eta| < 1,89$ в зависимости от конфигурации магнитной системы. В области **псевдобыстроты** $3,03 < |\eta| < 4$ вклад **неоднородности магнитного поля** в разрешение по **поперечному импульсу** заряженных частиц достигает **18–20%** в зависимости от конфигурации магнитной системы.
- Постоянное превышение интеграла реального **неоднородного поля** над интегралом **однородного поля** с плотностью магнитного потока **0,50976 Тл** на $4,7 \cdot 10^{-5}$ – $3,9 \cdot 10^{-4}$ от величины **интеграла однородного поля**, свидетельствует о высоком качестве магнитного поля установки **MPD**.

Благодарю за внимание!