



*Вячеслав Ключин (НИИЯФ МГУ)*

## **Вклад неоднородности магнитного поля в разрешение по поперечному импульсу заряженных частиц**

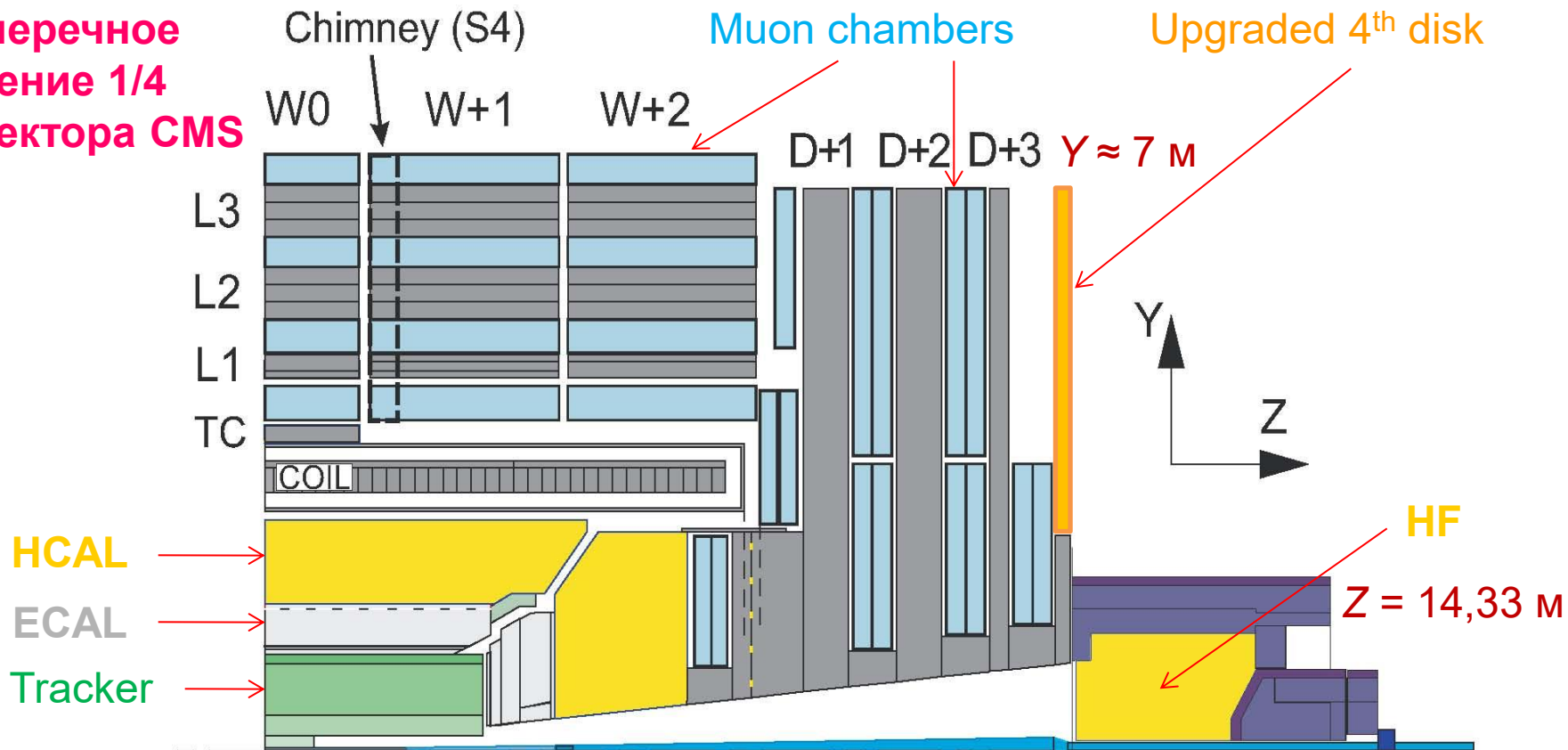
*«Физика частиц при средних и высоких энергиях»  
НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ, г. Протвино*

**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;

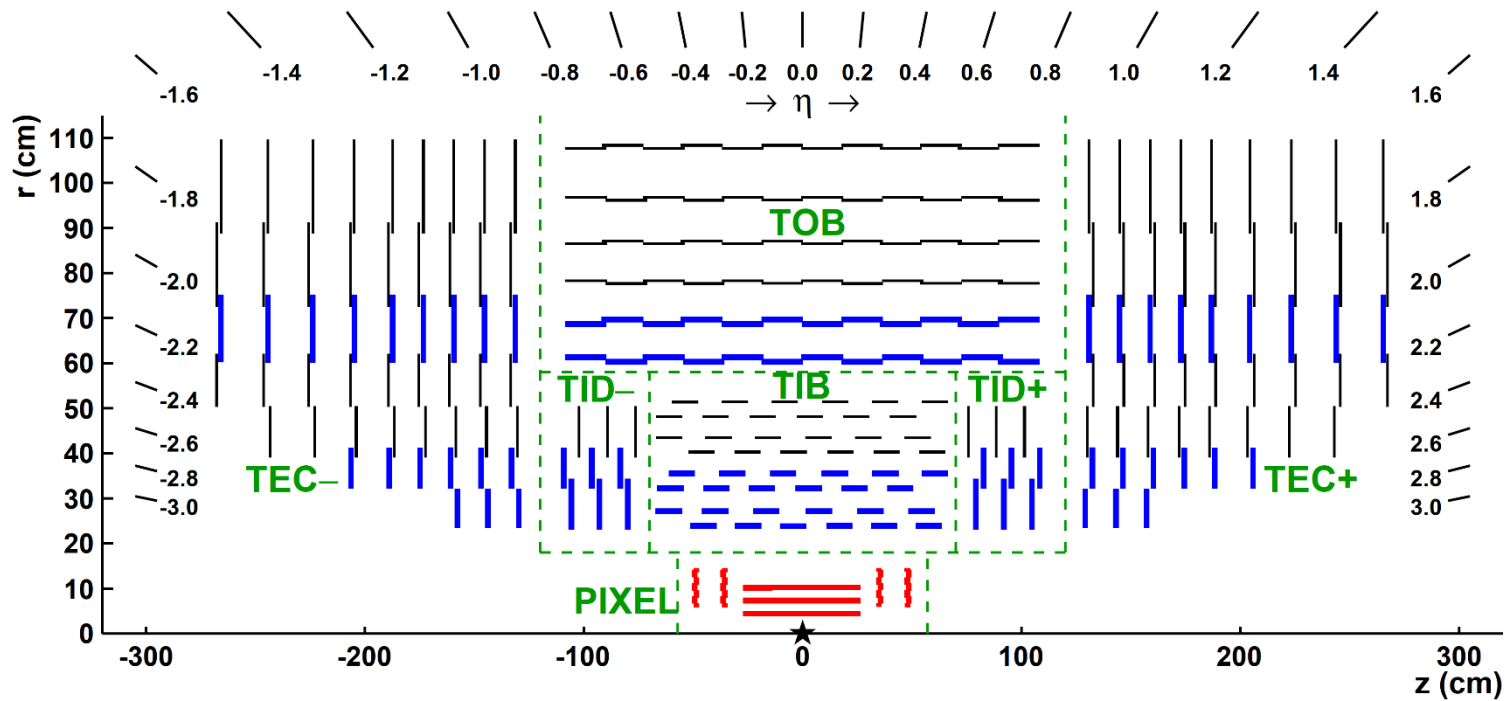
Electromagnetic calorimeter – in light grey;

Hadronic calorimeter – in yellow;

Muon chambers – in light blue;

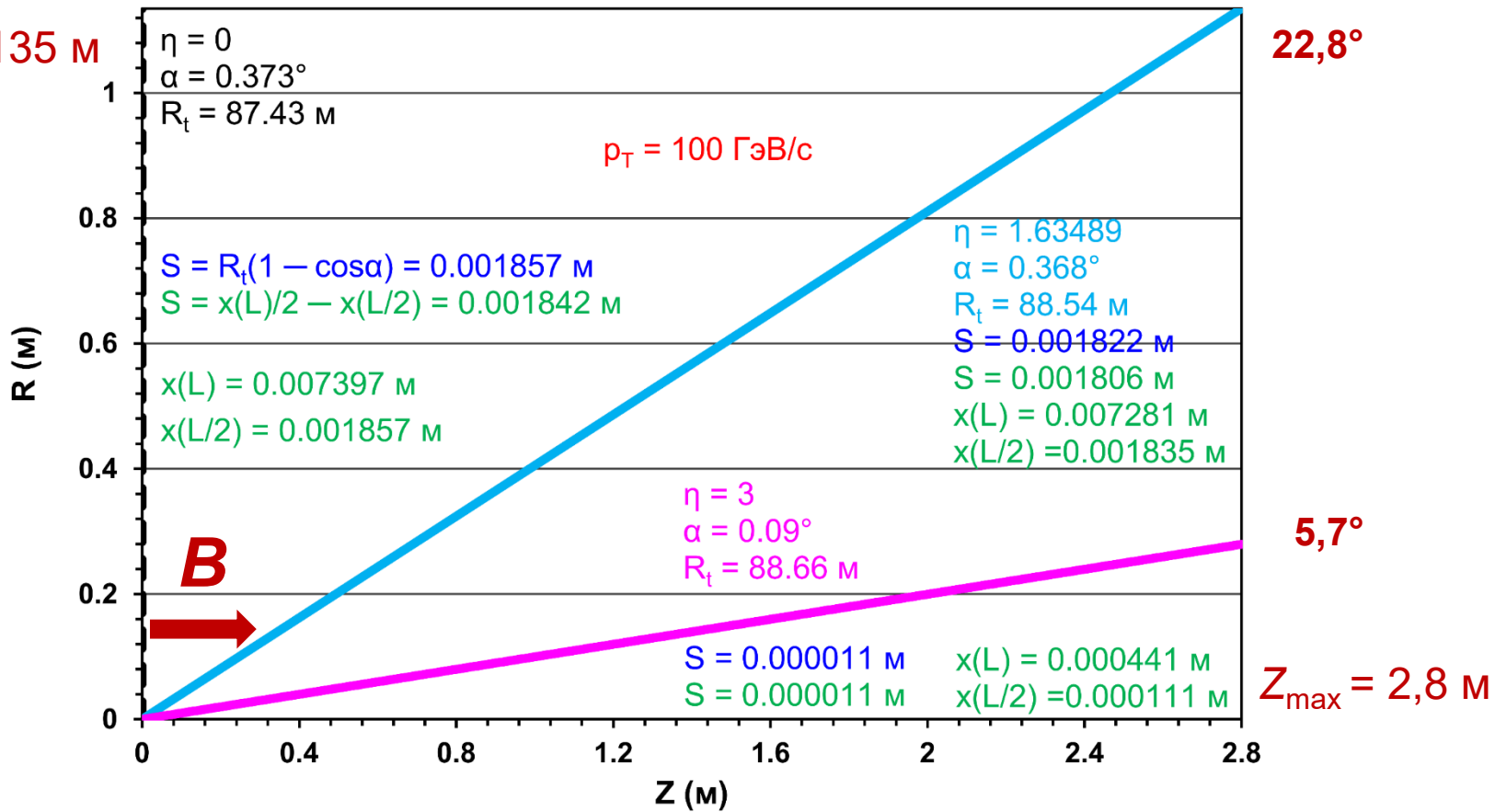
Magnet yoke – in dark grey;

Radiation protection shield – in violet.

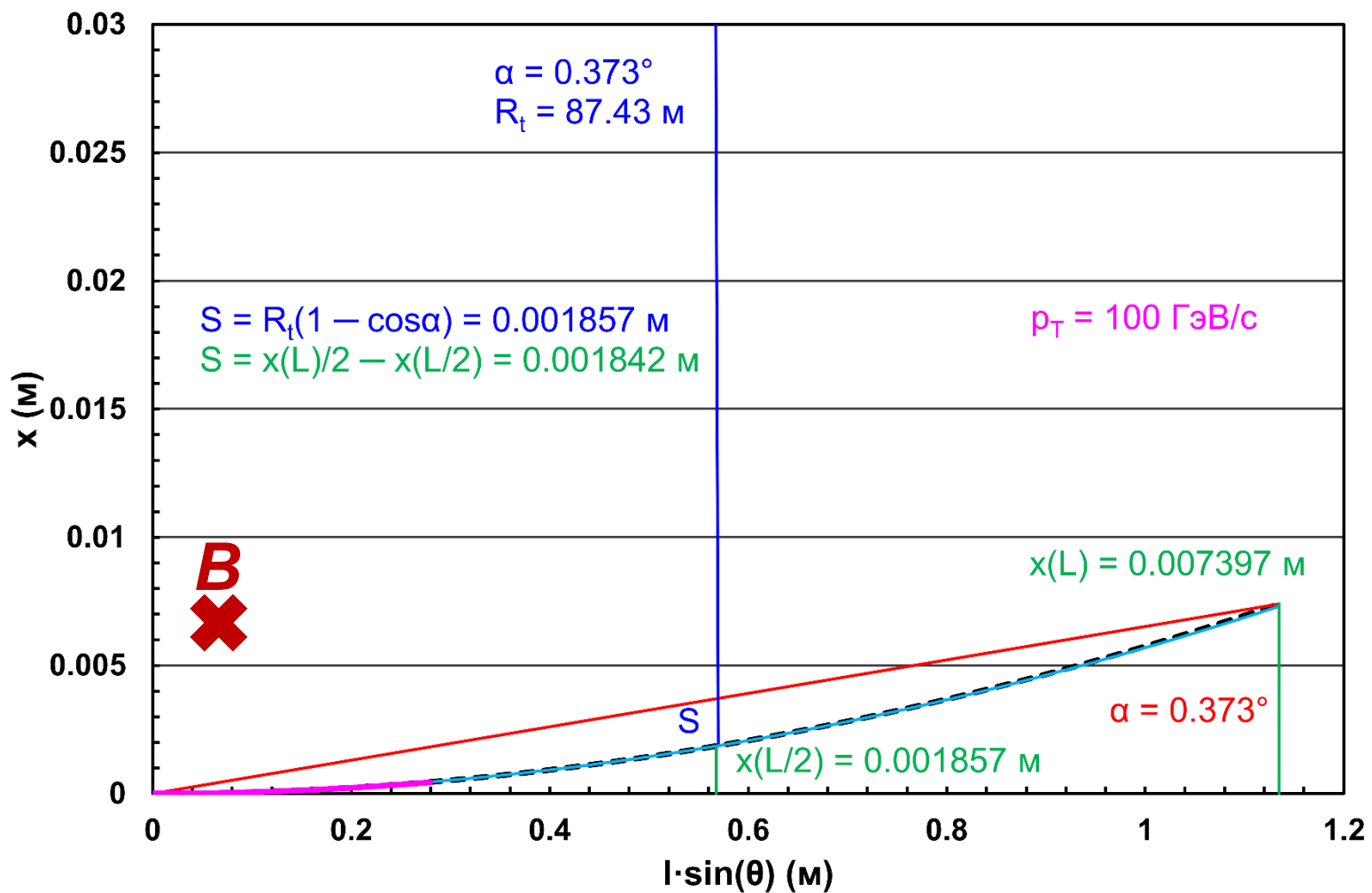


Схематическое поперечное сечение половины трекового детектора CMS в  $RZ$ -плоскости. Зеленые пунктирные линии разграничивают подсистемы детектора. Тонкими черными линиями показаны двумерные полосковые модули, толстыми синими линиями – трехмерные, состоящие из двух спаренных полосковых модулей, в которых 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 аксептанс. По краям обозначена псевдобыстрота  $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ , где  $\theta$  – полярный угол.

$$R_{\max} = 1,135 \text{ м}$$



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  $XY$ ;  $\alpha$  – 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  $x$ .



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  $R$  — радиус траектории,  $S$  — расстояние от центра дуги до центра ее основания (сагитта).

# Определение двойных интегралов магнитного поля

Рассмотрим траекторию **заряженной частицы**, испущенной под углом  $\theta$  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  $\alpha$  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**  $\theta$  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  $\delta$  в идеальном соленоиде выражается формулой Глюкштерна:

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

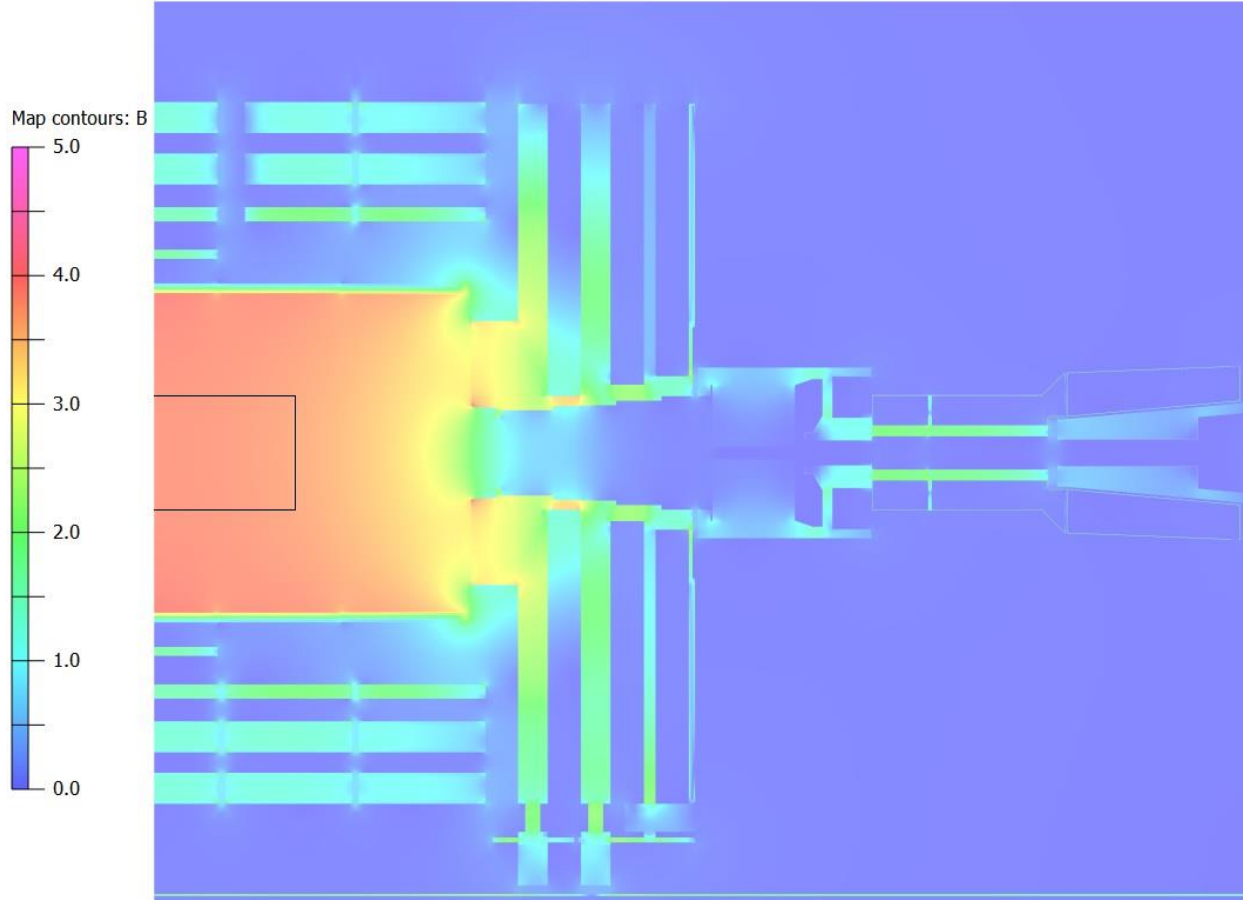
выраженной для однородного поля соленоида  $B$  [Тл],  $N$  равноудаленных друг от друга плоскостей (слоёв) детектора, пространственного разрешения  $\sigma$  [м] в плоскости (слое) детектора и длины трека  $L$  [м] в объёме трекового детектора. В неоднородном магнитном поле член  $BL^2$  следует заменить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

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

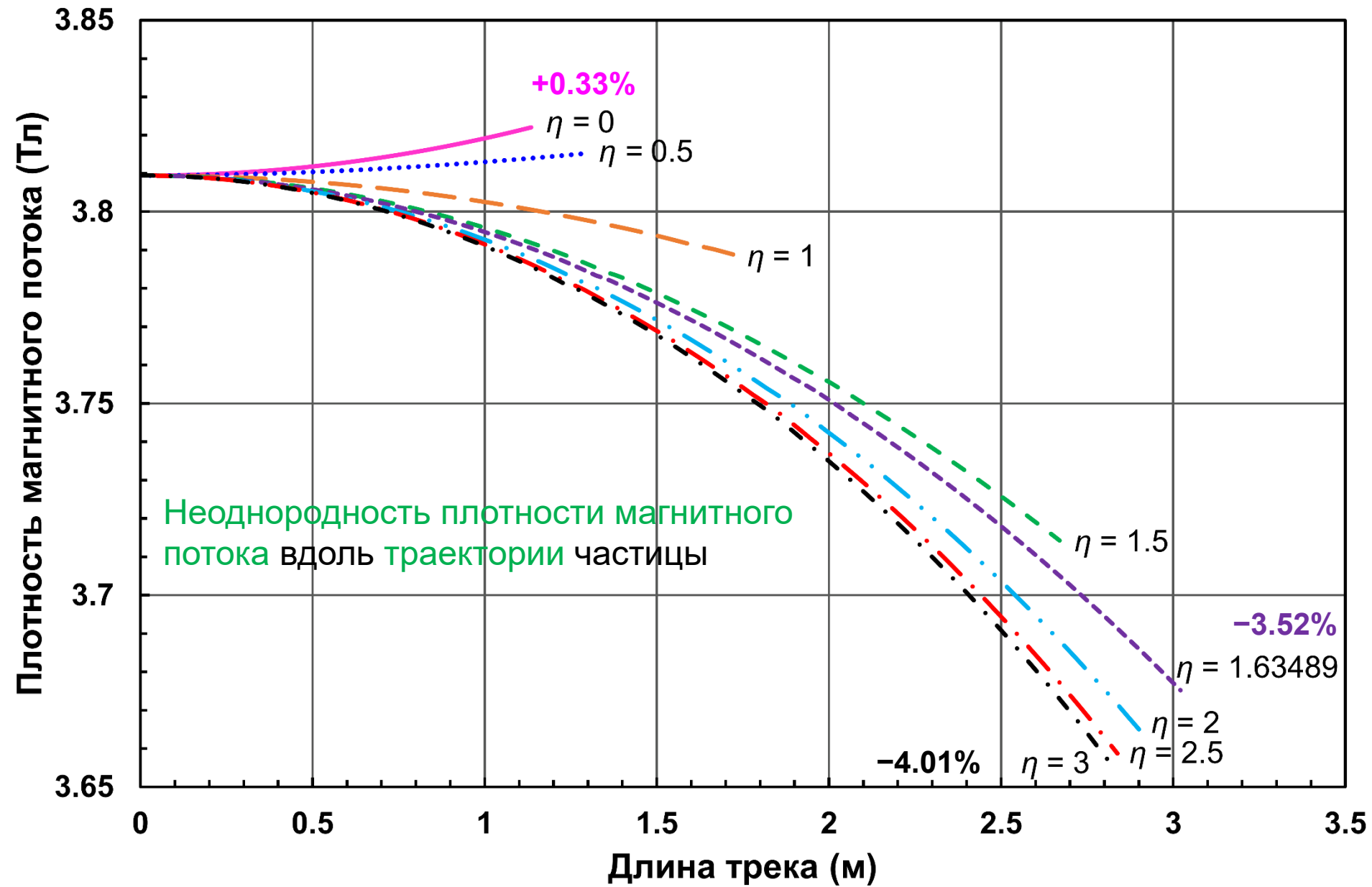
# Вклад неоднородности магнитного поля в разрешение по поперечному импульсу

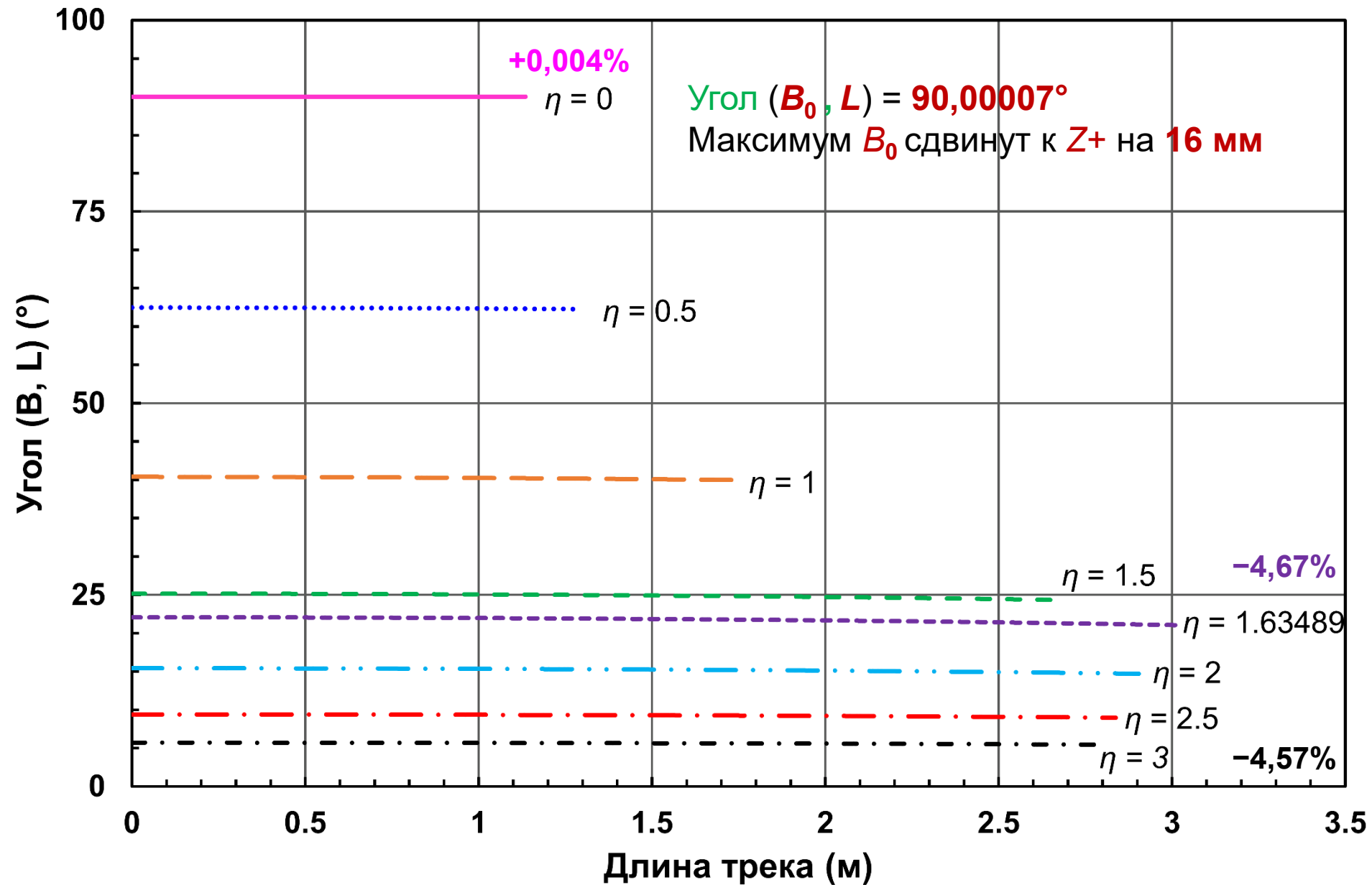
Деградация относительной точности измерения поперечного импульса  $\delta$  в реальном – *inhomogeneous* (*i*) соленоиде по отношению к идеальному – *homogeneous* (*h*) определяется соотношением  $(\delta_i - \delta_h) / \delta_i = 1 - R$ , где  $R = \delta_h / \delta_i$ , или  $R = x_i(L) / x_h(L)$ , 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 по поперечному импульсу частицы  $\Delta p_T / p_T$  пропорционально величине деградации  $1 - R$ .

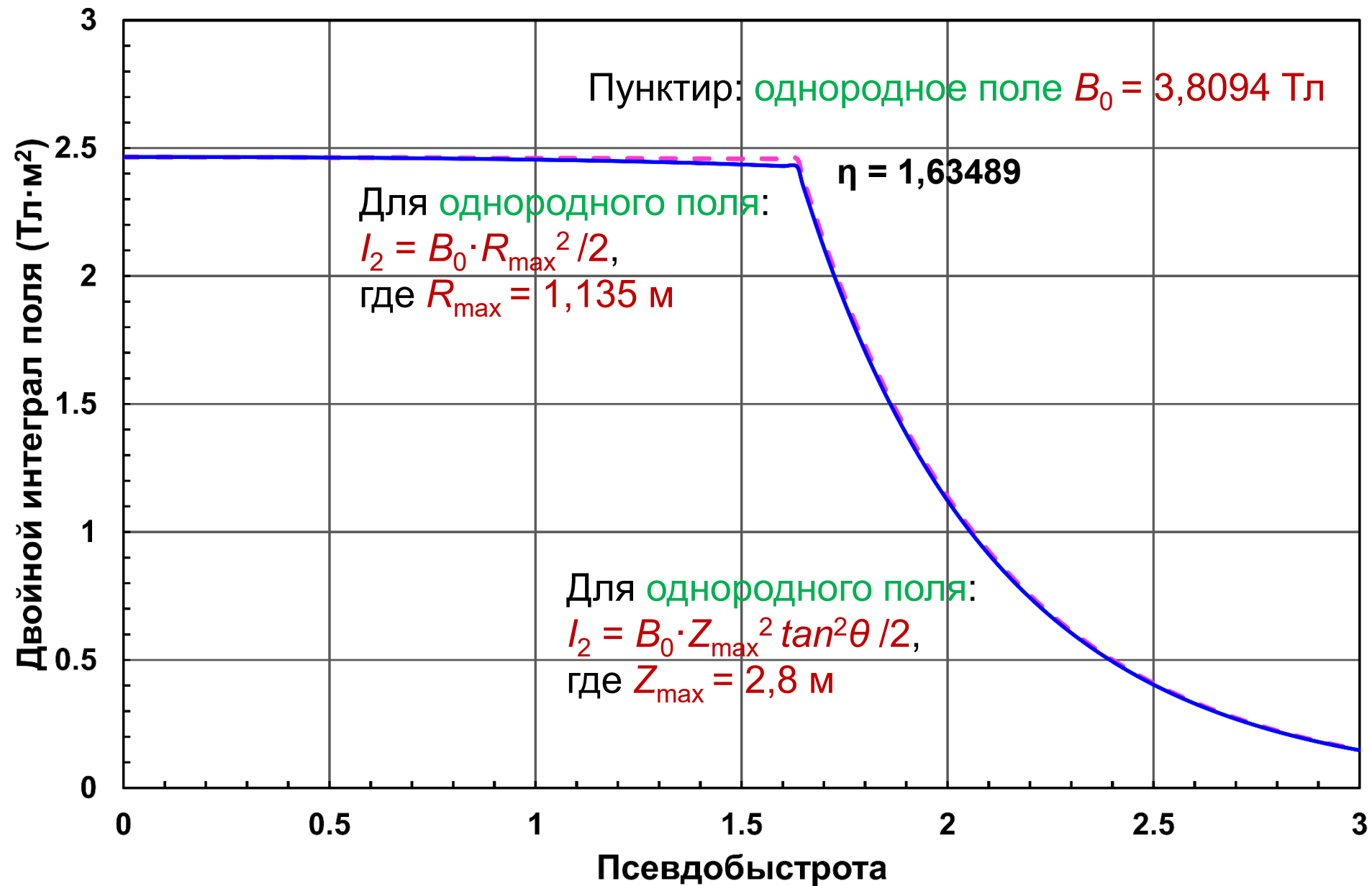
Сагитту трека частицы можно аппроксимировать выражением  $x(L)/2 - x(L/2)$ . Для идеального соленоида сагитта равна  $x(L/2)$ , поскольку  $x(L) = 4x(L/2)$ .

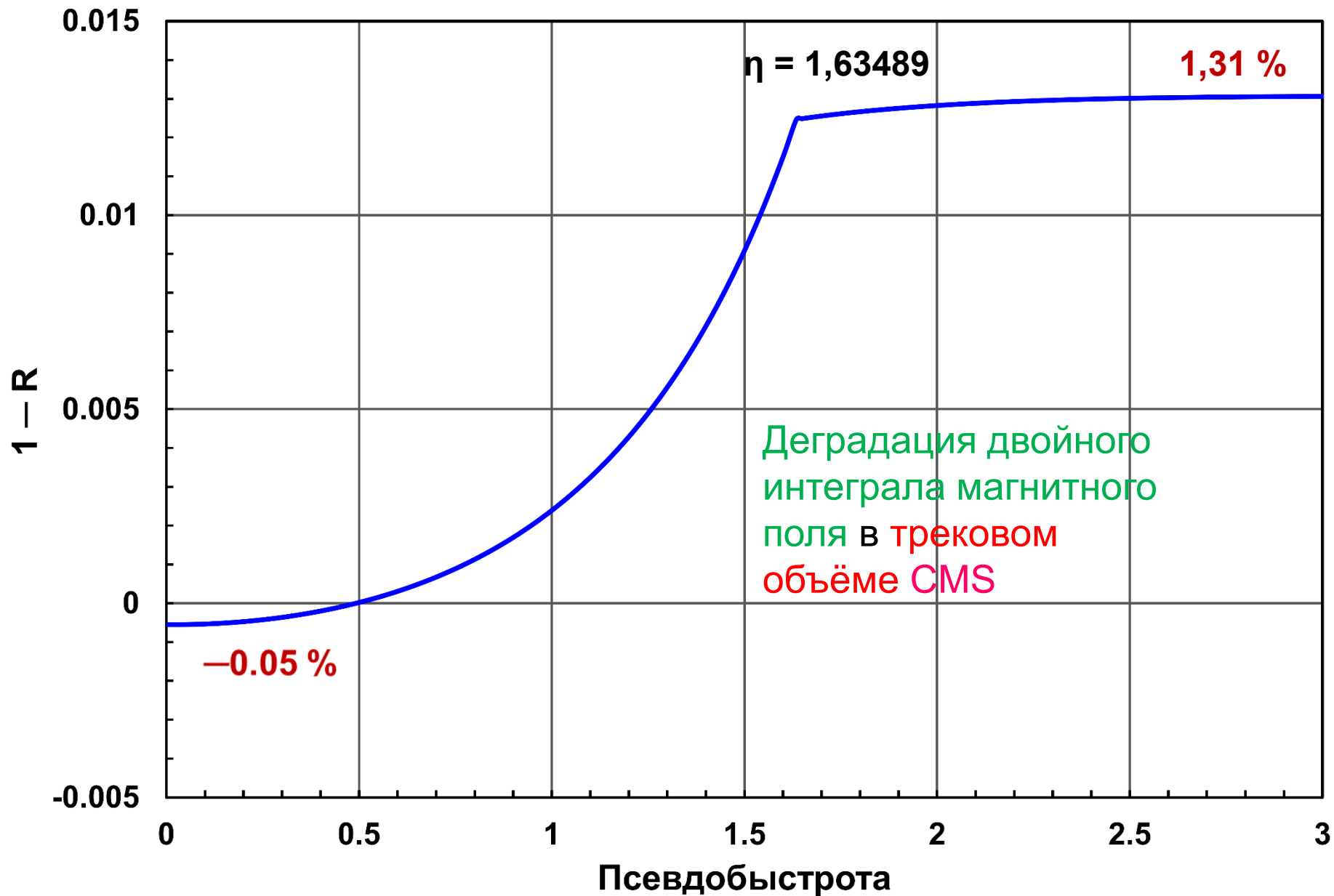


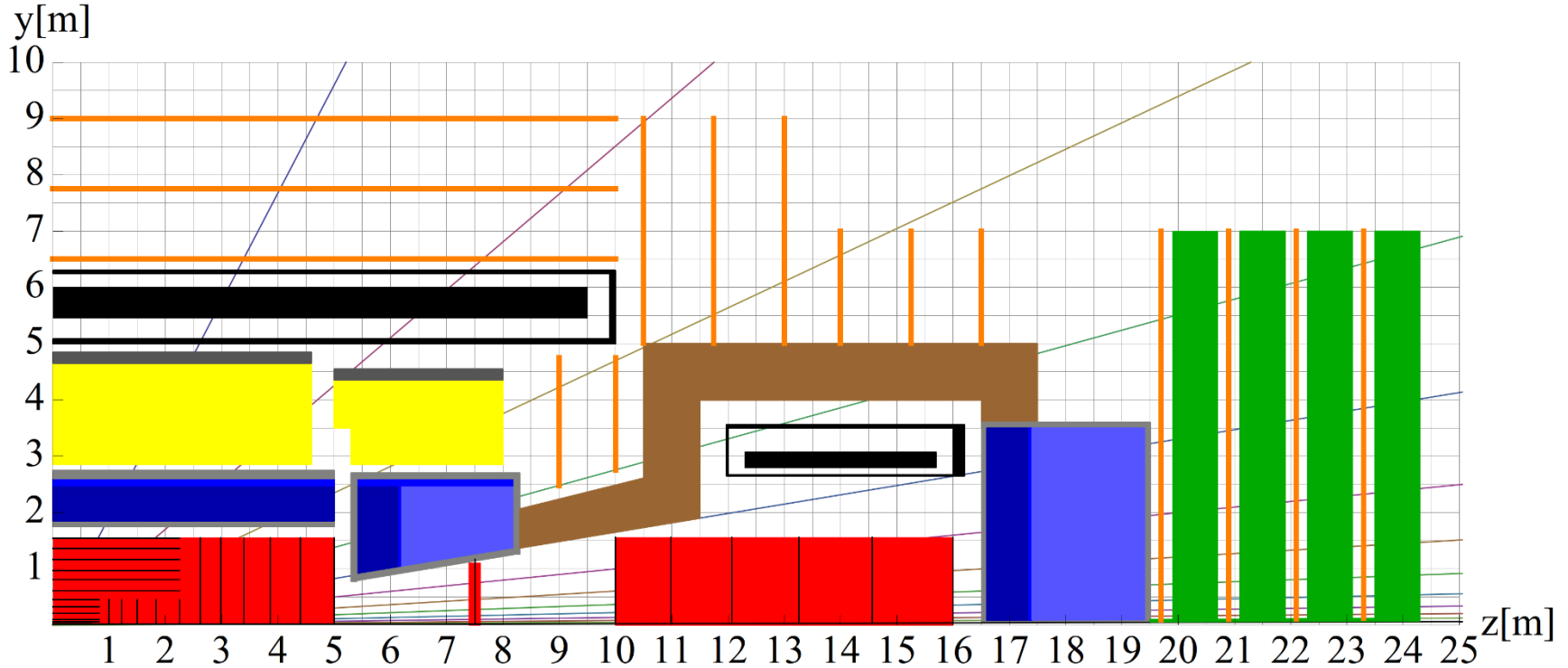
В детекторе **CMS** объём **трековой системы** представляет собой цилиндр длиной **5,6 м** и радиусом **1,135 м**. **Двойные интегралы магнитного поля** вычислены в области псевдобыстроты  $\eta$  от **0** до **3**, где  $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ , а  $\theta$  — **полярный угол** в системе координат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



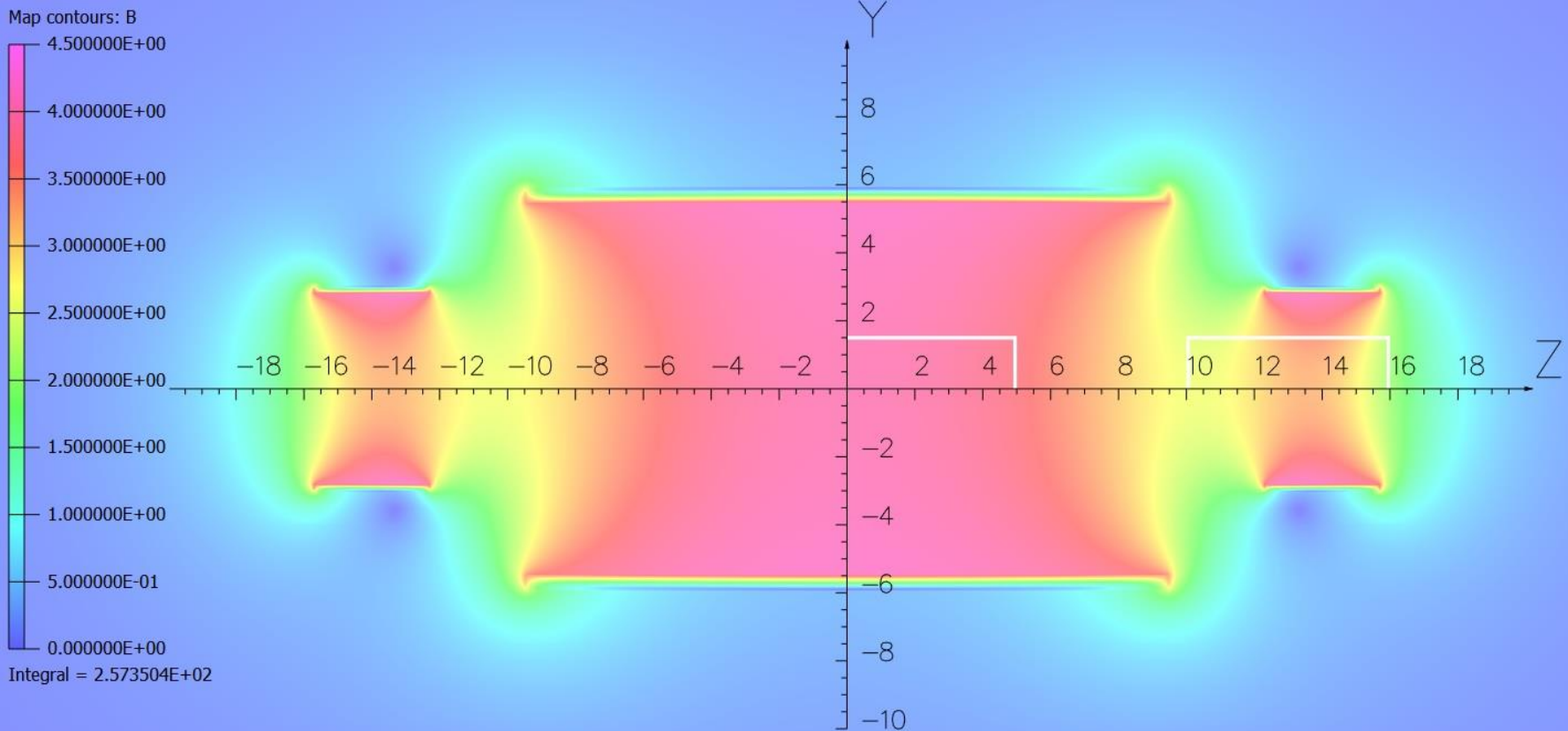




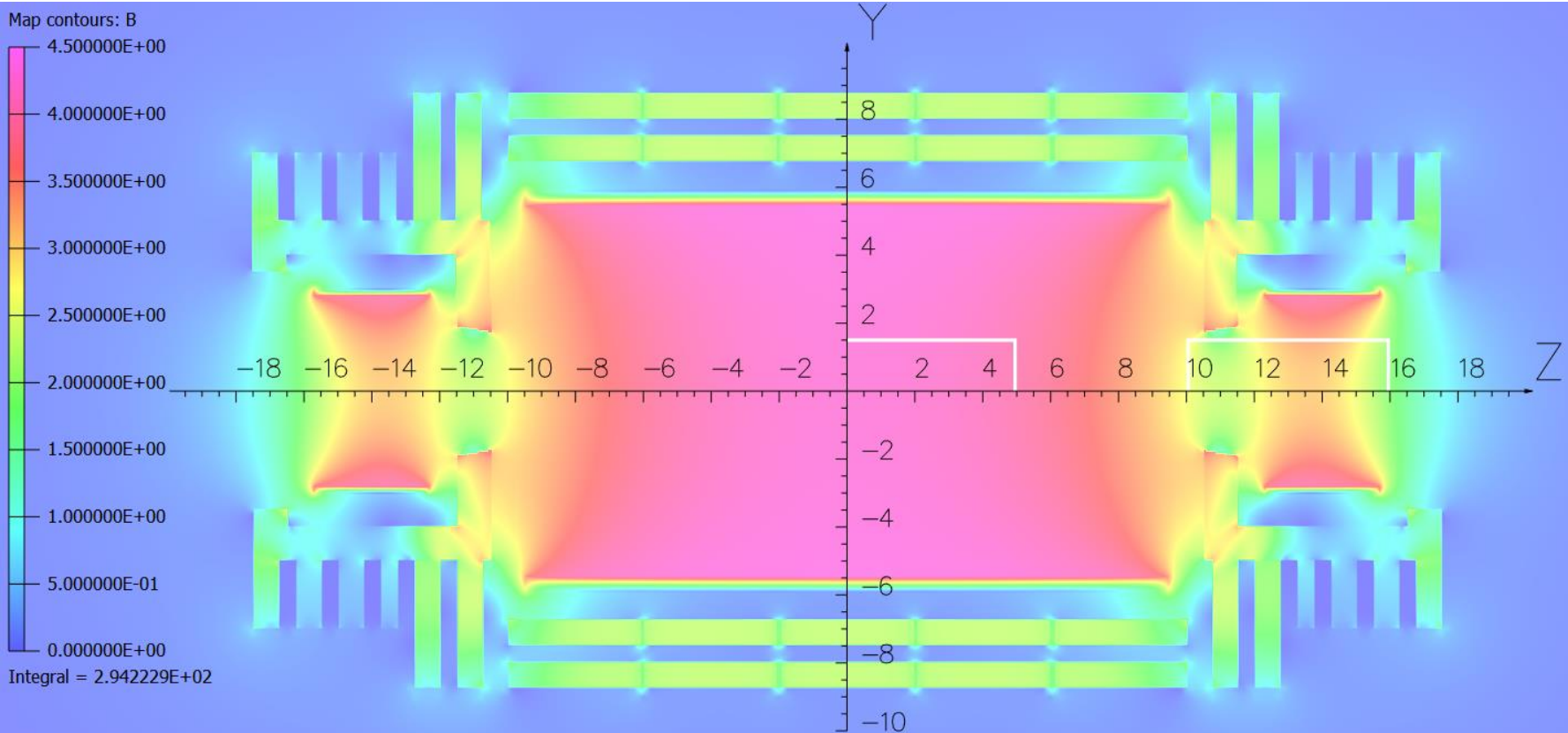




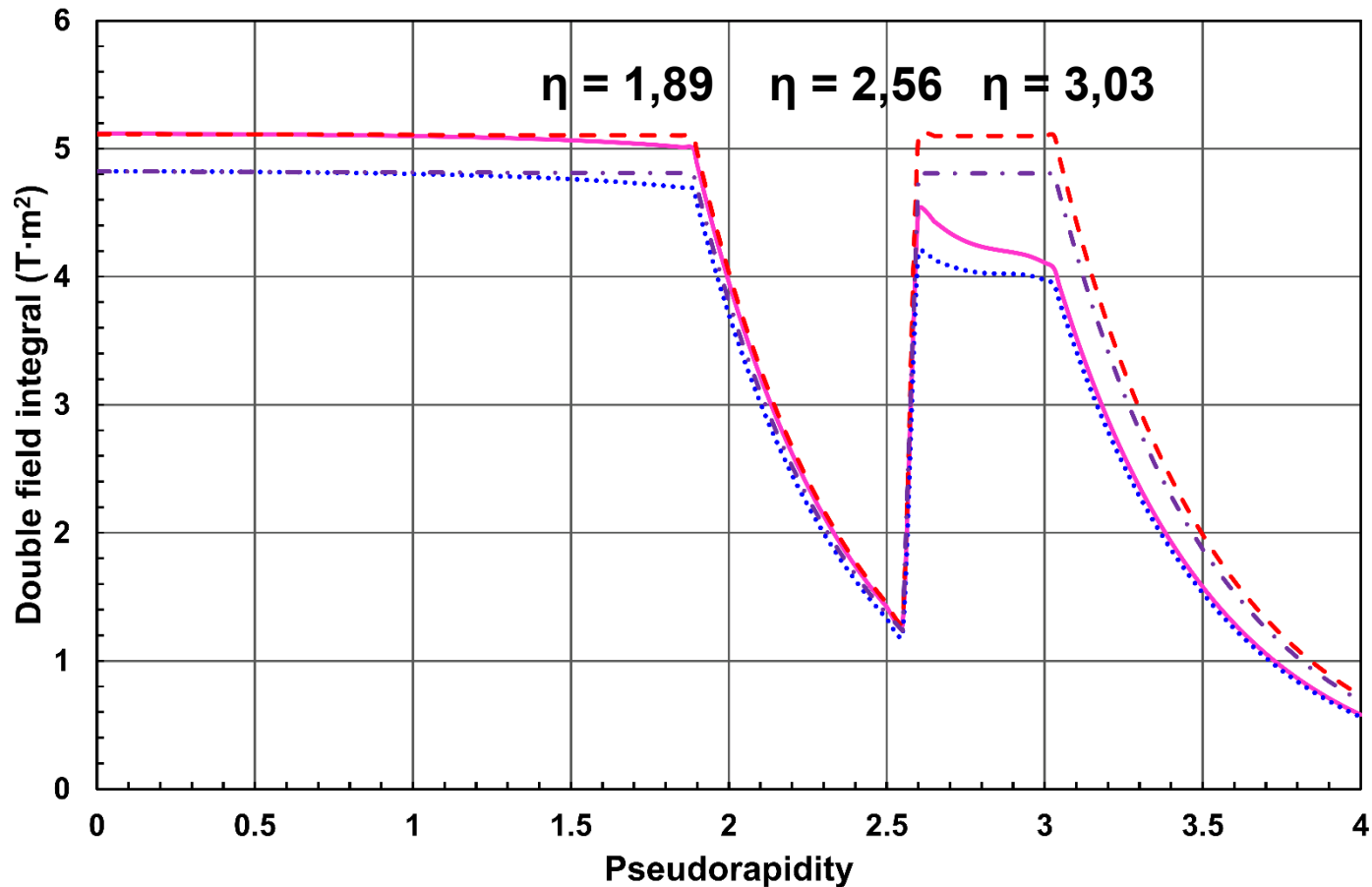
Четверть поперечного сечения детектора **FCC-hh** с **базовой магнитной системой**. Черным цветом показана четверть основной **сверхпроводящей катушки** и половина **передней катушки** в криостатах. **Коричневым** цветом показан защита от радиационного излучения, изготовленная из немагнитного материала. **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**.



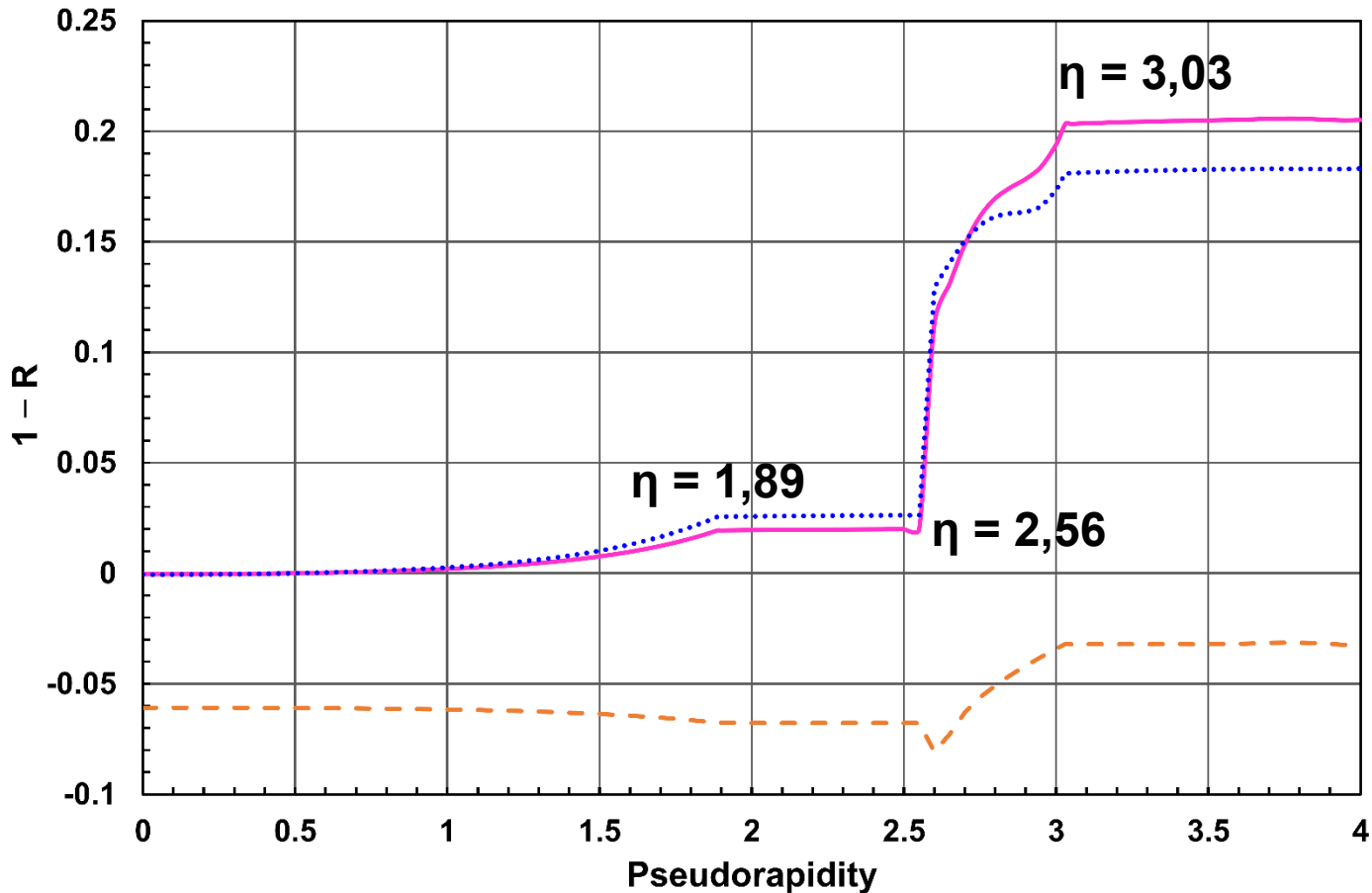
Распределение плотности магнитного потока в базовой магнитной системе детектора FCS-hh. Центральная плотность составляет 4 Тл. Трековая система радиусом 1,55 м и длиной 32 м включает в себя центральный цилиндр длиной 10 м и два боковых цилиндра длиной 6 м каждый. Плотность магнитного потока в боковых 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.



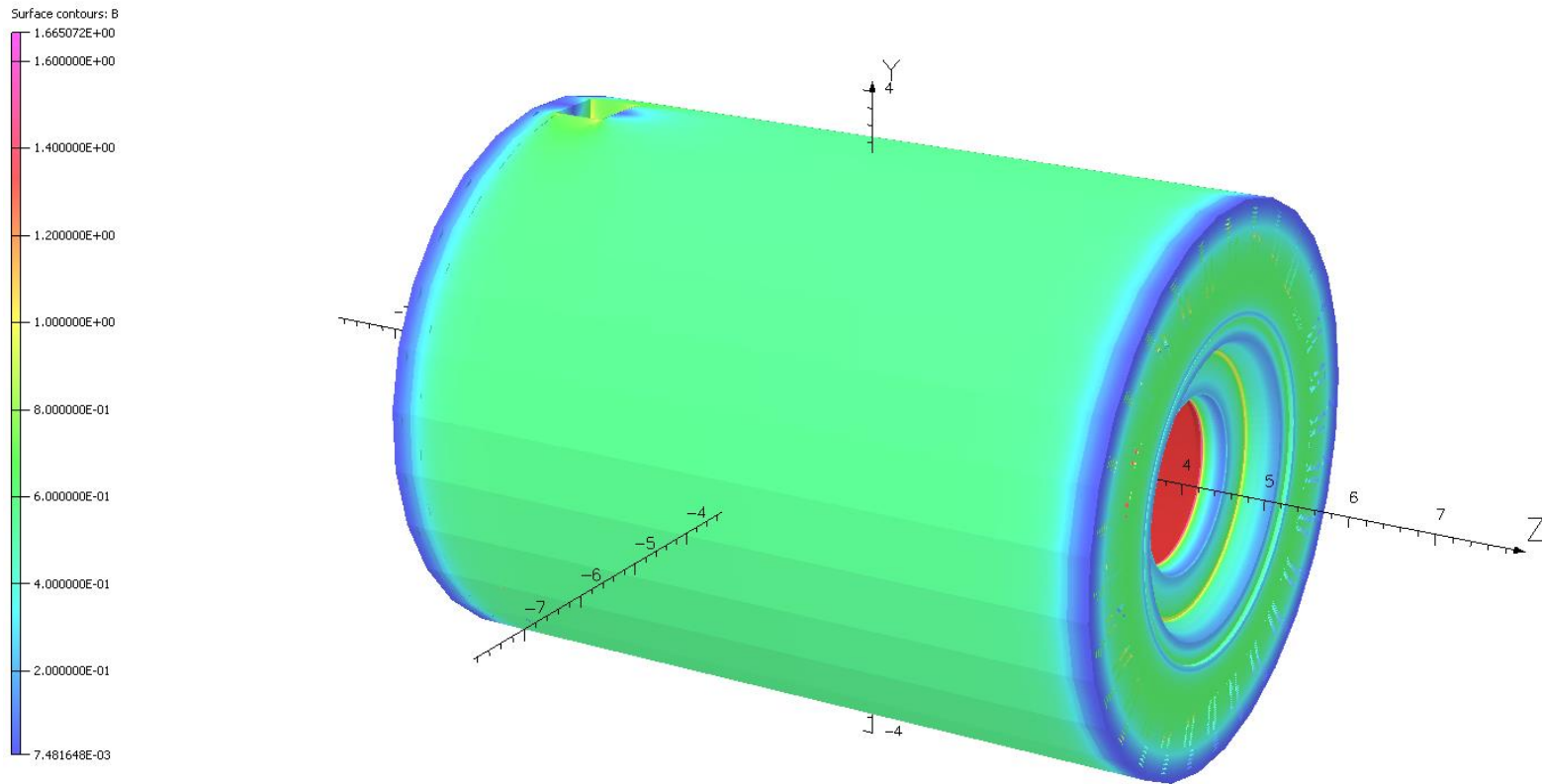
Распределение плотности магнитного потока в магнитной системе детектора **FCC-hh** с минимальным ярмом возвратного магнитного потока. Центральная плотность составляет **4,24 Тл**. Трековая система радиусом **1,55 м** и длиной **32 м** включает в себя центральный цилиндр длиной **10 м** и два боковых 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**.



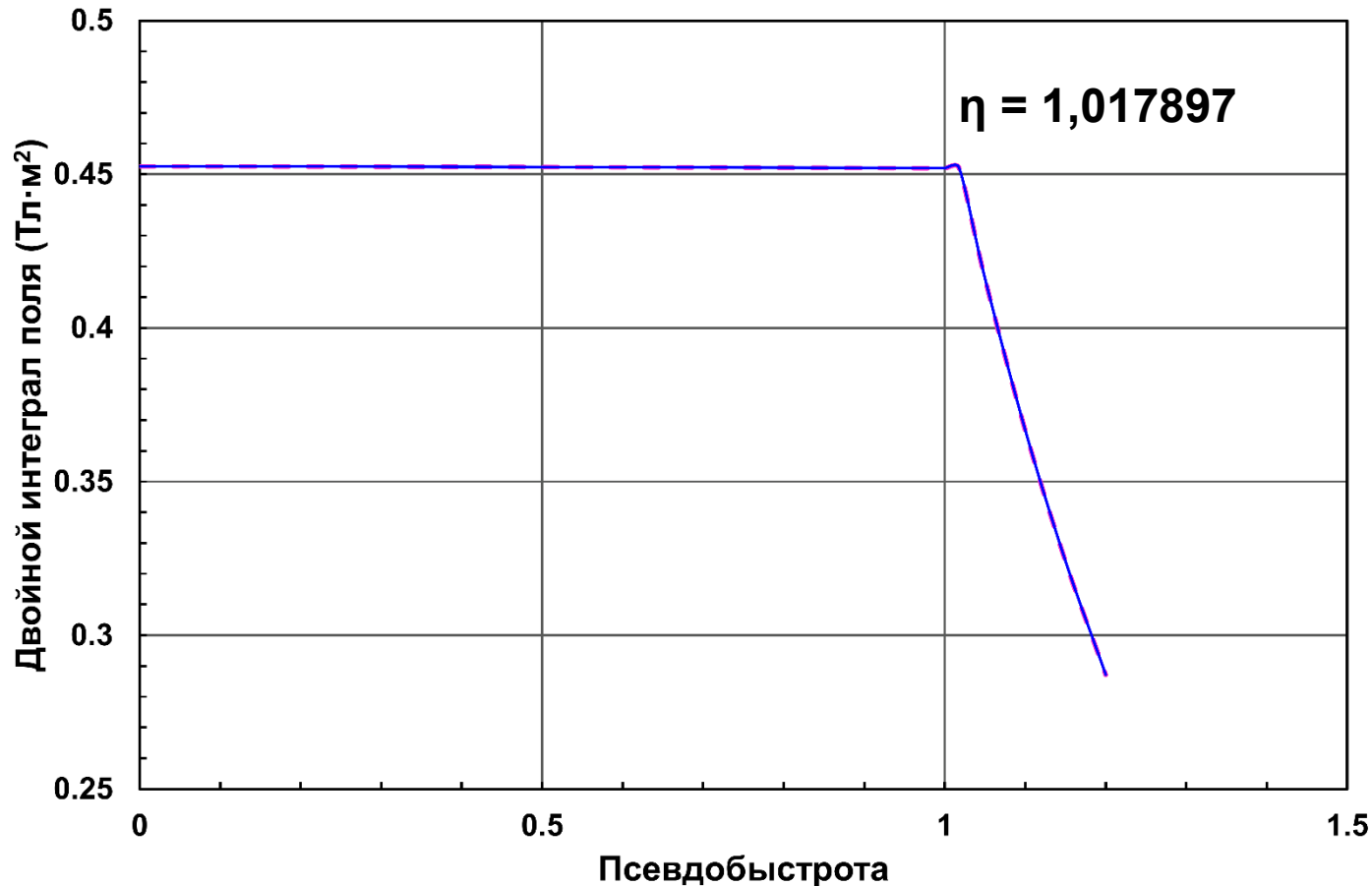
Двойные интегралы магнитного поля в вертикальной плоскости трековой системы для детектора FCC-hh с минимальным стальным ярмом (сплошная линия – интеграл неоднородного поля, пунктир – однородного поля 4 Тл) и для базовой магнитной системы (точки – интеграл неоднородного поля, штрих-пунктирная линия –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



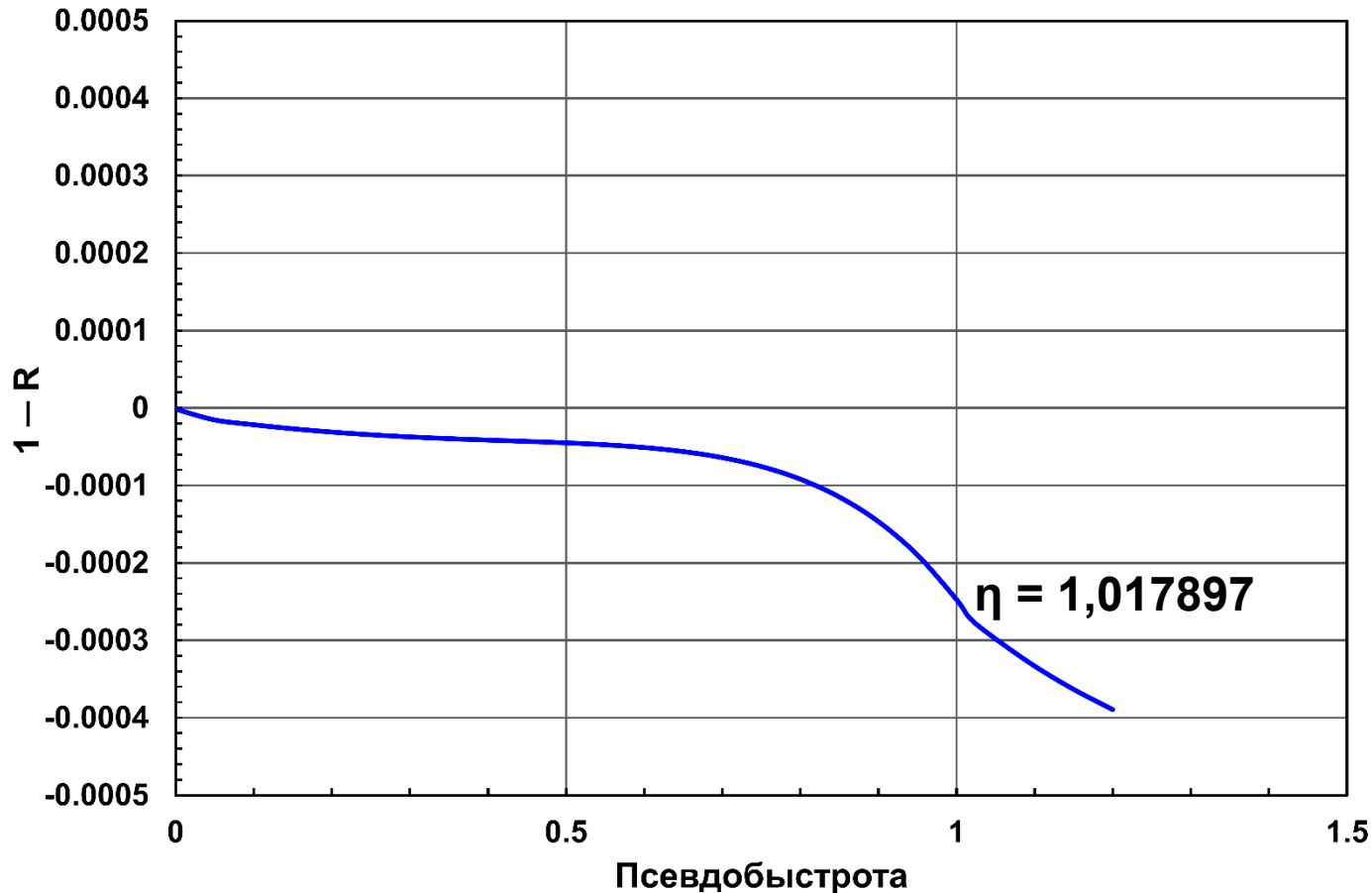
**Деградация двойных интегралов магнитного поля в вертикальной плоскости трековой системы для детектора FCC-hh с минимальным стальным ярмом (сплошная линия) и для базовой магнитной системы (точки) в зависимости от псевдобыстроты. Пунктирная линия представляет собой деградацию двойного интеграла детектора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



Трёхмерная модель магнита установки **MPD** включает в себя сверхпроводящий соленоид с центральной плотностью магнитного потока **0,5 Тл** диаметром **5 м** и длиной **7,6 м** и стальное ярмо магнита с внешним диаметром **6,6 м**. Полный ток в соленоиде составляет **3,06 МА-витков**. В каждом из двух конических полюсов ярма магнита размещены корректирующие катушки с полным током **100,6 кА-витков (Z-)** и **96,8 кА-витков (Z+)**.



**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.
- Определяющий 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 составляет **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!**