

10;12

Взаимодействие интенсивного протонного сгустка и электронного пучка в Тэватроне

© В.В. Пархомчук, В.Б. Рева,¹ В.Д. Шильцев²¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия² Fermi National Accelerator Laboratory,
P.O.Box 500, Batavia, IL 60510-0500
e-mail: reva@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 2 октября 2002 г.)

Электронная линза обладает возможностью создавать фокусирующие поля с управляемым профилем индивидуально для каждого протонного и антипротонного сгустков, что может позволить компенсировать эффекты, возникающие при их встрече. Первые эксперименты с такой линзой привели к уменьшению времени жизни антипротонов с нескольких сотен часов до нескольких десятков часов. В данной работе приводятся экспериментальные исследования процессов, возникающих при входе высокоинтенсивного протонного пучка в электронный пучок. На основании их предлагается два физических механизма, способных привести к уменьшению времени жизни антипротонного пучка.

Введение. Электронная линза как инструмент подавления эффектов встречи

Электронный пучок на орбите протонного пучка позволяет создавать фокусирующие поля с управляемым профилем в поперечном направлении, что эквивалентно линзе с нелинейными компонентами. Электронная линза обладает возможностями введения фокусировки, индивидуальной для каждого протонного или антипротонного сгустка, что позволяет надеяться на некоторое подавление эффектов встречи в основном месте встречи [1]. Первая электронная линза установлена на ускорителе Тэватрон в 2001 г. Ее общий вид приведен на рис. 1.

Исследования в течение первого года эксплуатации ТЭЛ (Tevatron Electron Lens) подтвердили ее эффективность, в частности, был получен расчетный сдвиг бетатронных частот около 0.01 для протонов и антипротонов на энергии 980 GeV при 2.5 А тока электронов с энергией 7 kV. Было также обнаружено, что взаимодействие с электронами приводит к ухудшению времени жизни антипротонов с нескольких сотен часов до нескольких десятков часов, причем это время зависит от электронного тока примерно как $\tau \propto J_e^{-2}$.

Наилучшее время жизни, достигнутое при токе около 2 А и сдвиге частоты около 0.008, составляло 20 h. Было предложено три объяснения этого явления: 1) нелинейные эффекты встречи, особенно сильные на краях электронного пучка, 2) шумы, флуктуации тока и положения электронов, 3) слабая неустойчивость за счет движения электронов в процессе взаимодействия. Данная работа посвящена экспериментам и теоретическому рассмотрению третьей возможности.

Сильные поля основных пучков могут существенно влиять на картину $e-p$ -взаимодействия из-за большой подвижности электронов. Для подавления этой подвижности в электронной линзе используется сильное про-

дольное магнитное поле до 4 Т, замагничивающее поперечные степени свободы электронов [2]. Но продольная подвижность остается большой, и за время пролета протонного или антипротонного сгустка может совершаться заметное число продольных плазменных колебаний. Если набег фазы плазменных колебаний взаимодействующих протонных и антипротонных сгустков всегда много меньше 1, то электроны, обладающие массой (учетом энергии), в 2 миллиона раз меньшей, колеблются гораздо сильнее и это может быть источником проблемы. Это эквивалентно сильно несимметричному коллайдеру, у которого поперечное движение легких частиц заморожено, но продольная подвижность остается высокой. Изучение колебаний в такой системе может оказаться очень полезным для выбора правильных решений и организации электрон-ионных коллайдеров с большой светимостью.

Эксперимент с интенсивным протонным сгустком, взаимодействующим с электронным пучком

Эксперименты проводились с протонным сгустком, имеющим начальное число частиц $1.63 \cdot 10^{11}$ на энергии 980 GeV. Длина сгустка в начале экспериментов составляла (среднеквадратичный разброс) 52.5 см, что соответствует пиковому току протонного пучка 5.9 А. Поперечный радиус протонного пучка на участке электронной линзы 0.6 мм, что в 3 раза меньше радиуса электронного пучка.

Ток электронного пучка в максимуме составлял 0.5 А и определялся амплитудой напряжения на анодном модуляторе. В процессе экспериментов энергия электронного пучка менялась от 3 до 10 kV, что позволяло изменять плотность электронного пучка на участке взаимодействия. Электроны распространялись в том же

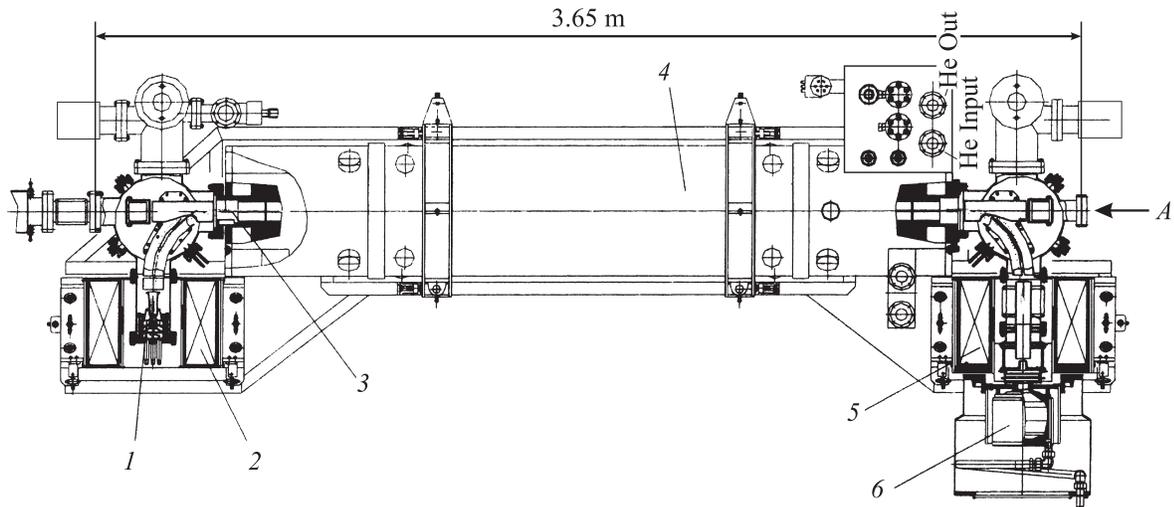


Рис. 1. Общий вид ТЭЛ: 1 — электронная пушка, 2 — соленоид пушки, 3 — электронный пучок, 4 — сверхпроводящий соленоид, 5 — соленоид коллектора, 6 — коллектор, А — электронный пучок.

направлении, что и протонный пучок, и в результате совместного действия электрического и магнитного полей воздействие на протонный пучок уменьшалось при увеличении скорости электронов. Сдвиг частоты колебаний протонного пучка составляет

$$\Delta\nu = \frac{n_e r_p \beta_x}{2\gamma} (1 - \beta_e) l_e, \quad (1)$$

что при 4 keV энергии соответствует 0.0015 (n_e — плотность электронов, l_e — длина пучка электронов, $r_p = 1.53 \cdot 10^{-18}$ м — классический радиус протона, $\beta_e = v_e/c$ — скорость электронов, $\gamma = 1044$ — релятивистский лоренц-фактор для протонов с энергией 980 GeV).

Сигнал с пикап-электрода принимался на вход осциллографа 50 Ω и был пропорционален скорости изменения пространственного заряда в области пикапов. Динамика непосредственно пространственного заряда получалась численным интегрированием измеренных данных. Пикап-электрод был расположен на расстоянии 2.3 м от точки входа протонного пучка в электронный.

На рис. 2 мы видим проинтегрированный сигнал с пикап-электрода, зарегистрированный в момент, когда электронные и протонные пучки совмещены в пространстве и во времени. С момента 0.1 до 1.6 μ s это импульс электронного пучка. В момент времени 0.95 μ s появляется протонный пучок. Большой пик — это сигнал от основного банча. Рядом расположенный импульс соответствует, по-видимому, сигналу от частиц, захваченных в соседнюю сепаратрису ВЧ (период ВЧ равен 19 ns). Интересно отметить, что в первоначальный момент работы с протонным пучком эти вторичные пики были существенно меньше (отсутствовали). Ниже мы подробно рассматриваем, что же происходит с электронами в первые 200 ns после пролета протонов.

На рис. 3 показана разница между пространственным зарядом при прохождении протонного пучка и без него для различных значений катодного напряжения (энергии пучка электронов). В момент 0.065 μ s видно поляризационное поле, движущееся вместе с протонным пучком. В моменты от 0.095 до 0.115 μ s наблюдается приход быстрой волны пространственного заряда, возбужденной в момент входа протонного пучка в электронный. В моменты от 0.11 до 0.17 μ s приходит медленная волна пространственного заряда. С уменьшением энергии и соответствующим увеличением плотности электронов (при фиксированном токе 0.5 А) временная задержка между приходами этих двух волн растет. Две сплошные линии, дополненные вертикальными отрезками, показывают времена прихода возмущений вычисленных по формуле

$$\tau = \frac{L_{\text{pick-up}}}{\omega_{pe} a_e \sqrt{1 + 2 \ln(b/a_e)}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{pick-up}}$ — расстояние до пикап-электрода; a_e — радиус электронного пучка; b — радиус вакуумной камеры (7 см); ω_{pe} — частота плазменных колебаний,

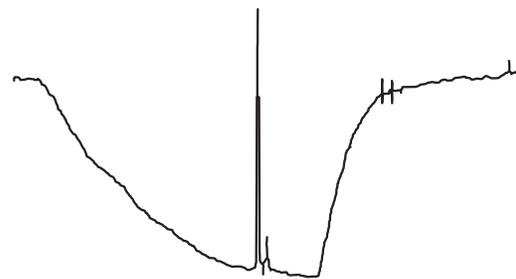


Рис. 2. Изменение пространственного заряда в пикапе со временем. Сигнал нормализован на максимум линейной плотности заряда протонного пучка.

определенная с учетом того, что за счет пространственного заряда реальная скорость электронов в ТЭЛ меньше той, что получается из простой формулы для энергии.

Из данного рисунка видно, что вход протонного пучка действительно приводит к сильному возмущению протонного пучка, существенно большему, чем то, что распространяется вместе с пучком.

На рис. 4 представлены зависимости интенсивного протонного пучка и его среднего времени жизни от времени, прошедшего от начала эксперимента. В течение первых 1.5 h электронные и протонные пучки были разведены. Интенсивность протонного пучка в это время не изменялась и составляла $16.6 \cdot 10^{10}$. После того как

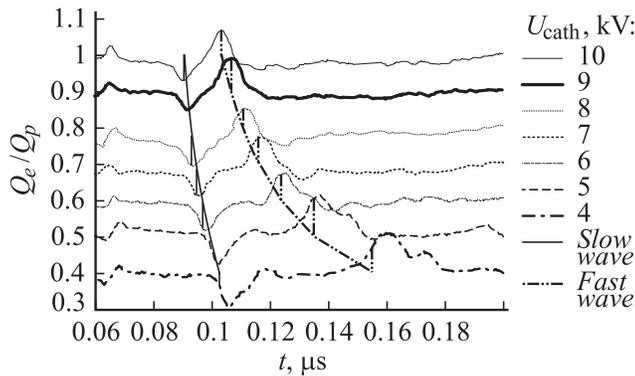


Рис. 3. Возмущения заряда в пикапе при разных энергиях электронного пучка. Для большей наглядности графики разведены по вертикали на величину 0.1 друг от друга.

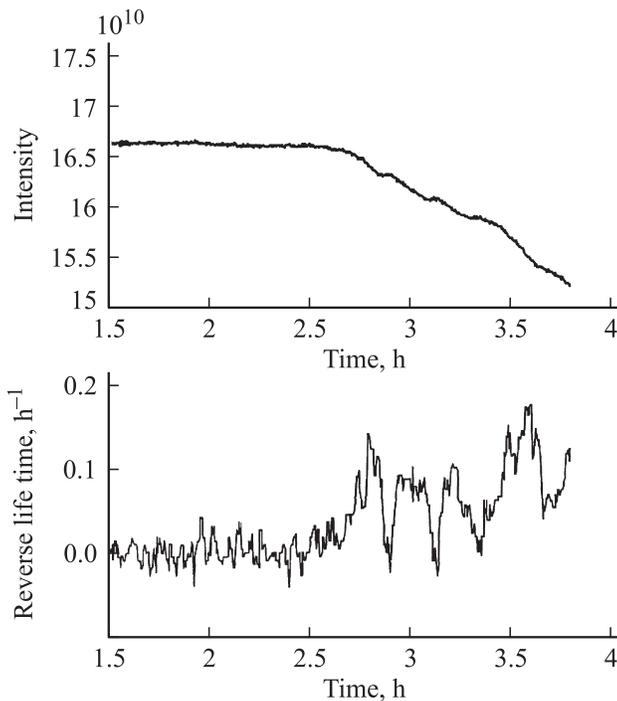


Рис. 4. Интенсивность протонного пучка и обратное время жизни протонов во время эксперимента.

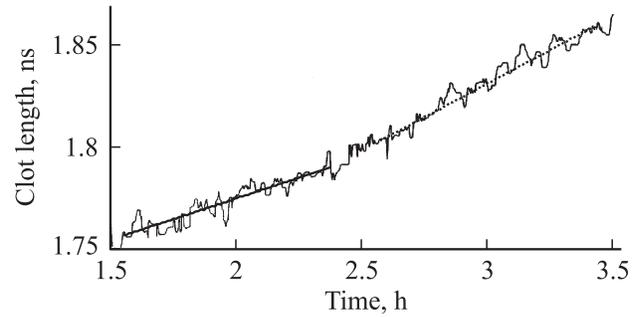


Рис. 5. Среднеквадратичная длина протонного сгустка во время эксперимента.

пучки были совмещены, интенсивность начала неуклонно падать. На спадающей кривой в период с 1.5 до 2.5 h хорошо видны небольшие ступеньки. Они соответствуют временам, когда электронный пучок выключался. При этом падение интенсивности протонного пучка тоже прекращалось. На рис. 5 показан аналогичный график, но для времени жизни протонного пучка. Опять же хорошо видно, что после начала реальной работы с электронным пучком время жизни существенно уменьшается. На следующем графике представлена зависимость длины пучка от времени с начала эксперимента. На начальном участке без взаимодействия с электронным пучком время нарастания длины $\sigma/(d\sigma/dt) = 44$ h, а во второй половине при наличии взаимодействия с электронным пучком — 27 h.

Модель продольных волн в электронном пучке

Образование возмущения пространственного заряда в электронном пучке можно представить состоящим из двух частей. Первая — это поляризационное поле движущееся вместе с потоком, вторая — это две волны, возникающие в момент входа(выхода) протонного пучка из электронного.

Поляризационное поле. Запишем гидродинамические уравнения, описывающие поведение длинноволновых продольных возмущений (длина возмущения существенно больше, чем размер камеры и пучка),

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + n_{0e} \frac{\partial v_{ez}}{\partial z} = 0 \quad (\text{уравнение непрерывности}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_{ez}}{\partial t} = \frac{e}{m_e} E_z \quad (\text{уравнение движения}), \quad (4)$$

$$E_z = -2\pi a_e^2 e \ln \frac{b}{a_e} \frac{\partial n_e}{\partial z} + 2\pi a_i^2 e \ln \frac{b}{a_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} \quad (\text{связь между}$$

пространственным зарядом и продольным электри-

ческим полем). (5)

Вводя продольное смещение электронов от положения равновесия

$$v_{ez} = \partial \xi_e / \partial t, \quad (6)$$

получаем

$$\frac{\partial^2 \xi_e}{\partial t^2} - c_e^2 \frac{\partial^2 \xi_e}{\partial z^2} = c_i^2 \frac{\partial f_i}{\partial z}. \quad (7)$$

Здесь c_e, c_i — скорости волн пространственного заряда подсчитанные по плотности электронов и протонов соответственно; $f_i = n_i(z)/n_{i0}$ — безразмерное продольное распределение плотности протонного пучка.

Считая, что ξ_e и f_i есть функции только от $x = z - ct$, и учитывая, что $c \gg c_e$, получаем

$$\frac{\partial^2 \xi_e}{\partial x^2} = -\frac{c_i^2}{c^2} \cdot \frac{\partial f_i(x)}{\partial x}. \quad (8)$$

Теперь можно записать окончательное выражение для возмущения плотности электронов под действием поляризованного поля

$$n_e = \frac{c_e^2}{c^2} n_i(x). \quad (9)$$

Для следующих параметров ионного и электронного пучков: $a_e = 1.75 \text{ mm}$, $J_e = 0.5 \text{ A}$, $E_e = 7 \text{ kV}$, $N_p = 1.63 \cdot 10^{11}$, $a_i = 0.6 \text{ mm}$, $\sigma_p = 52 \text{ cm}$ получаем значение максимального возмущения плотности электронов

$$\frac{n_e}{n_{e0}} \approx 0.024, \quad (10)$$

что находится в разумном согласии с результатами экспериментов (рис. 3).

Возмущения при входе и выходе протонного пучка. Для оценки возмущений, возникающих в момент входа и выхода протонного пучка, воспользуемся следующей моделью. Будем считать, что электроны, попавшие в точку встречи одновременно с протонами, приобретут конечное совмещение при нулевой остаточной скорости к моменту, когда протонный пучок покинет точку встречи. Электроны, которые придут в точку встречи чуть позже, приобретут уже меньшее смещение при некоторой ненулевой остаточной скорости. Электроны, которые придут совсем поздно, останутся в невозмущенном состоянии. Таким образом, задача распадается на две подзадачи. Первая — определение начальных скоростей и смещений электронов под действием электрического поля, связанного с протонами, вторая — временная и пространственная эволюция начального возмущения.

Запишем уравнение для смещения электронного диска, находящегося в точке z , относительно точки встречи (из уравнения (7) видно, что в момент прохождения протонного пучка собственным полем электронного пучка можно пренебречь)

$$\frac{\partial^2 \xi_e}{\partial t^2} = \frac{c_i^2}{c} \frac{\partial f_i}{\partial t}, \quad (11)$$

где $t = z/c$.

Значения ξ_e и $d\xi_e/dt$ в момент $t = z/v_e$ будут соответствовать начальным условиям в точке z для уравнения, описывающего распространение продольных волн по электронному пучку. Таким образом, в момент $t = 0$ (на самом деле точка $z = 0$ в начальных условиях (12) соответствует точке $z = v_e l_p/c$, но этим можно пренебречь либо уменьшить на соответствующую величину расстояние между пика-электродами)

$$\xi'_{e0}(z) = \left. \frac{\partial \xi_e}{\partial t}(z) \right|_{t=0} = -\frac{c_i^2}{c} f_i \left(\frac{c}{v_e} z \right),$$

$$\xi_{e0}(z) = -\frac{c_i^2}{c^2} \int_{-\infty}^{z \cdot c/v_e} f_i(z') dz'. \quad (12)$$

Решение волнового уравнения (7) с нулевой правой частью (пучок уже пролетел) хорошо известно

$$\xi_e(z, t) = \frac{1}{2} (\xi_{e0}(z - c_e t) + \xi_{e0}(z + c_e t))$$

$$+ \frac{1}{2c_e} \int_{z-c_e t}^{z+c_e t} \xi'_{e0}(z') dz'. \quad (13)$$

Отсюда можно сразу найти возмущение плотности электронного пучка в произвольный момент времени. В данном выражении учтено, что пучок движется относительно нас со скоростью v_e

$$n_e(z, t) = n_{e0} \cdot \frac{1}{2} \frac{c_i^2}{c^2} \left[f_i \left(\frac{c}{v_e} \cdot (z - c_e t - v_e t) \right) \cdot \left(\frac{c}{v_e} + \frac{c}{c_e} \right) \right.$$

$$\left. + f_i \left(\frac{c}{v_e} \cdot (z + c_e t - v_e t) \right) \cdot \left(\frac{c}{v_e} - \frac{c}{c_e} \right) \right]. \quad (14)$$

Для ранее указанных параметров получаем максимальное возмущение электронного пучка

$$\frac{n_e}{n_{e0}} \approx 0.32.$$

Видно, что рассчитанное по линейной модели возмущение уже немало, поэтому для получения адекватных оценок желательно использовать численный расчет. На рис. 6 приведены результаты расчетов, выполненных в рамках модели плоских дисков. Электронный и ионные пучки разбиваются на плоские жесткие диски с характерным расстоянием между ними $d \leq a_e, a_i$. Каждый диск создает соответствующее электростатическое поле, воздействующее на все остальные диски. Протонные диски на участке встречи мгновенно погружаются в поток электронных дисков.

Модель рассеяния на плазменных флуктуациях, возникающих после пролета протонного сгустка

Оценки показывают, что резкое падение времени жизни при наличии электронного пучка не может быть связано с одночастичным рассеянием на электронах.

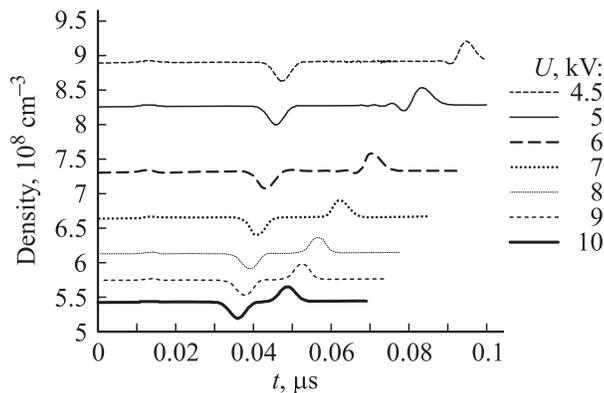


Рис. 6. Расчет волн в электронном пучке после пролета сгустка с $1.57 \cdot 10^{11}$ протонов. Расстояние от точки влета до пикапа 200 см.

Одним из возможных механизмов усиления рассеяния протонов на электронном пучке является рассеяние на плазменных колебаниях, возникающих при пролете протонного сгустка. Каждый пролетающий сквозь электроны протон возбуждает вокруг своей траектории плазменные колебания, энергия которых и составляет ионизационные потери протона. „Следы“ от каждого протона в виде микроскопических плазменных колебаний совершают осцилляции с частотой плазменных колебаний, но так как расстояние между протонами за время пролета не меняется, то и фаза колебаний электрического поля, воздействующая на конкретный протон, не изменяется. Суммарное энерговыделение при одном пролете протона сквозь электронный пучок составляет

$$\Delta E = \frac{2\pi n_e e^4 l_e}{m_e c^2} \ln(\rho_{\max}/\rho_{\min}), \quad (15)$$

где ρ_{\max} , ρ_{\min} — максимальный и минимальный прицельные параметры столкновения электронов и протонов.

Величина электрического поля в плазменных колебаниях может быть оценена как

$$\delta E = \sqrt{\frac{16\pi r_e n_e e^2 N_p}{a_e^2} \ln(\rho_{\max}/\rho_{\min})}. \quad (16)$$

Протоны, пролетающие в „хвосте“ сгустка, будут испытывать поперечные удары $\Delta p = e\delta E l_e/c$, что приводит к падению времени жизни этих протонов до

$$\frac{1}{\tau} = \frac{16\pi r_e r_p^2 l_e^2 N_p n_e}{a_e^2 \gamma_p^2 \Theta_p^2} \ln\left(\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}}\right) f_0 \quad (17)$$

при энергии электронов 4 кеV, токе 0.5 А, плотности $1.4E101/cm^3$, такая оценка дает 5h, что неплохо соответствует измерениям. Подчеркнем, что удар получается от случайных полей, возбуждаемых индивидуальными протонами, поэтому складывается не амплитуда поля, а квадрат амплитуды (энергия).

Эффекты продольных следовых полей в электронном пучке

Для оценки воздействия когерентных волн на протонный пучок вычислялось значение набора энергии протонного пучка за один пролет через электронную линзу. На рис. 7 показаны эти так называемые следовые потенциалы для различных энергий электронного пучка. Как видно, в зависимости от расстояния вдоль сгустка имеются три характерные области в этой функции: ближняя зона воздействия, связанная с быстрой поляризацией электронного пучка и локальными плазменными колебаниями, и два пика, связанных с воздействием быстрой и медленной волн в месте разведения электронного и протонных пучков. Протоны, пролетающие продольную волну в прямолинейной части, проходят как положительное электрическое поле волны, так и отрицательное, и в этой зоне воздействие волны незначительное. Но в зоне разведения протоны пролетают только часть волны, и воздействие сильно возрастает. Сама величина изменения энергии мала (около 50 еV), и, для того чтобы воздействовать на 1 ТеV-ные протоны, нужно набрать около 100 МеV (примерно энергетический разброс), а на это требуется около 2Е6 оборотов или 40 s. В принципе при наличии когерентных колебаний в протонных и антипротонных сгустках эти следовые поля могут стать источником нагрева частиц, сильно отклоненных от равновесия, что будет вызывать потери частиц без заметного нарастания эмиттанса пучка.

Заключение

Мы рассмотрели волны пространственного заряда, возбуждаемые коротким протонным сгустком ускорителя Тэватрон в пучке замагниченных электронов низкой энергии. Экспериментально наблюдающиеся скорости и амплитуды волн хорошо описываются теоретической моделью. Предложено два механизма, при которых волны заряда могут приводить к наблюдаемому ухудшению

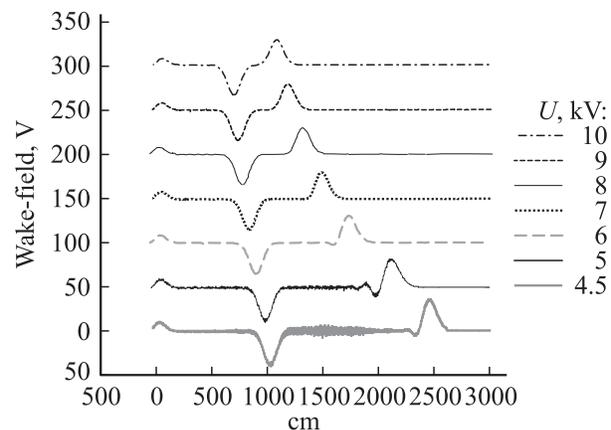


Рис. 7. Расчет потенциала продольных волн в электронном пучке после пролета сгустка.

времени жизни пучка протонов. Предполагается провести дальнейшие исследования с электронной линзой для проверки сделанных предсказаний о зависимости (17) времени жизни протонов от токов протонов и электронов как $1/\tau \propto N_p J_e$ и наблюдения удлинения протонного сгустка и, может быть, образования сателлитов при увеличении электронного тока.

Список литературы

- [1] *Shiltsev V. et al. // Phys. Rev. ST-AB. 1999. Vol. 2. P. 071001.*
- [2] *Burov A., Danilov V., Shiltsev V. // Pgs. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 3605.*