

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ИМПЕДАНСА НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СГУСТКА ЭЛЕКТРОНОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-4М

В. М. Борин^{а, б, в, 1}, В. Л. Дорохов^а, О. И. Мешков^{а, б}

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В работе рассмотрено влияние эффектов искажения потенциальной ямы и продольной микроволновой неустойчивости на продольные размеры пучка электронов в коллайдере ВЭПП-4М. В результате получено значение продольного широкополосного импеданса, с помощью которого можно рассчитывать продольный размер пучка в любом режиме коллайдера.

In this paper, the influence of the effects of potential well distortion and longitudinal microwave instability on the longitudinal size of the electron beam in the VEPP-4M collider is considered. As a result, the value of the longitudinal broadband impedance was obtained, which can be used to calculate the longitudinal size of the beam in any collider mode.

PACS: 29.20.–с; 41.60.Cg; 29.27.–а

ВВЕДЕНИЕ

Динамика пучков заряженных частиц в ускорителях определяется конфигурацией магнитных и электрических полей, используемых для управления траекторией пучка. Такие магнитные и электрические поля создаются различными системами ускорителя, например квадрупольными линзами, дипольными магнитами, ВЧ-резонаторами и др. При наличии неучтенных электрических и магнитных полей динамика и параметры пучка частиц в ускорителе будут отличаться от ожидаемых. К таким неучтенным полям относятся электромагнитные поля, создаваемые движущимися в ускорителе пучками частиц. Взаимодействие с наведенными пучком в стенках вакуумной камеры электромагнитными полями можно описать с помощью импеданса связи [1]. Импеданс связи является важным параметром ускорителя, так как от его значения зависит динамика пучка и устойчивость его движения, в частности, от импеданса связи зависят геометрические размеры пучка. Взаимодействие с наведенными полями может приводить к различным неустойчивостям движения, примером такой

¹E-mail: V.M.Borin@inp.nsk.su

неустойчивости является продольная микроволновая неустойчивость [1]. В данной работе исследуется изменение продольного размера пучка под действием микроволновой неустойчивости пучка электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М. При этом удалось отделить эффект удлинения пучка, связанный с искажением потенциальной ямы. Удлинение пучка, вызванное влиянием эффектов, связанных с взаимодействием с наведенными полями, приводит к снижению светимости коллайдера при совместной работе с детектором КЕДР. Результаты проводимых ранее исследований продольного импеданса связи ВЭПП-4М [2] не проверялись в широком диапазоне режимов работы коллайдера, также не проводилось изучение эффекта искажения потенциальной ямы. Кроме того, измерения [2] проводились с помощью электронно-оптического диссектора, временное разрешение которого заметно ниже, чем у используемой в данной работе стрик-камеры.

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА С НАВЕДЕННЫМИ ПОЛЯМИ

На коллайдере ВЭПП-4М наблюдаются два основных эффекта взаимодействия сгустка заряженных частиц с наведенными в вакуумной камере ускорителя полями, которые влияют на длину сгустка: эффект искажения потенциальной ямы и продольная микроволновая неустойчивость. Ниже приведены основные сведения об этих эффектах.

Эффект искажения потенциальной ямы возникает под действием видимого пучком ускоряющего напряжения, вносимого остаточными полями сгустка. Обычно этот эффект заметен уже при небольших токах сгустка. При этом эффекте не происходит увеличения энергетического разброса сгустка, который при малых токах связан с размером сгустка уравнением (1) [3, 4], так как одновременно с этим происходит сдвиг частоты синхротронных колебаний. Удлинение электронного сгустка под действием искажения потенциальной ямы определяется кубическим уравнением (2) [1]:

$$\sigma_l = \frac{c\alpha_p \sigma_E}{\Omega_s E}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right) + \frac{I_b \alpha \operatorname{Im} \left[\left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right)_{\text{eff}} \right]}{\sqrt{2\pi} E Q_{s0}^2} \left(\frac{R}{\sigma_{s0}}\right)^3 = 0, \quad (2)$$

где σ_{s0} — продольный размер сгустка в отсутствие коллективных эффектов, определяемый уравнением (1); Q_{s0} — частота синхротронных колебаний в единицах частоты обращения в отсутствие коллективных эффектов; $\operatorname{Im} [(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}]$ — мнимая часть эффективного продольного импеданса связи.

С дальнейшим увеличением тока сгустка возможно достижение порога продольной микроволновой неустойчивости сгустка. Этот эффект является результатом взаимодействия сгустка с наведенными им же wake-полями. С подробным описанием эффекта можно ознакомиться в работах [5] и [6]. Пороговый ток продольной микроволновой неустойчивости определяется следующим выражением:

$$I_{\text{th}} = \frac{\sqrt{2\pi}\alpha E \sigma_s}{R[Z_{\parallel}/n]_{\text{BB}}} \left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2, \quad (3)$$

где $[Z_{\parallel}/n]_{BB}$ — модуль широкополосного импеданса связи вакуумной камеры. Если учесть связь энергетического разброса сгустка σ_E с его продольным размером (2), то из (3) получим увеличение продольного размера, связанного с продольной микроволновой неустойчивостью в явном виде:

$$\sigma_s^3 = \frac{R^3 \alpha |Z_{\parallel}/n|_{BB}}{\sqrt{2\pi} E Q_{s0}^2} I_b. \quad (4)$$

Однако стоит не забывать, что выше порога микроволновой неустойчивости эффект искажения потенциальной ямы все еще продолжает оказывать влияние на продольные размеры сгустка. Поэтому следует учитывать изменение частоты синхротронных колебаний Q_s из-за искажения потенциальной ямы, а также изменение энергетического разброса σ_E/E в зависимости от продольной микроволновой неустойчивости. Если учесть оба эти эффекта, то получается следующая зависимость продольного размера сгустка от его тока [6]:

$$\sigma_s^3 = \frac{R^3 \alpha}{\sqrt{2\pi} E Q_{s0}^2} I_b (|Z_{\parallel}/n|_{BB} - \text{Im}[(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}]). \quad (5)$$

Таким образом, если измерить зависимость продольного размера сгустка от его тока, то, пользуясь зависимостями (2) и (4), можно определить значения $|Z_{\parallel}/n|_{BB}$ и $\text{Im}[(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}]$. Знание этих величин позволяет рассчитать зависимость энергетического разброса от тока сгустка после достижения порога продольной микроволновой неустойчивости.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА В ПУЧКЕ НА КОЛЛАЙДЕРЕ

Эксперименты по изучению продольного распределения частиц в пучке электронов проводились на коллайдере ВЭПП-4М и являлись частью экспериментов по измерению энергетического разброса ускорителя в широком диапазоне энергий [7].

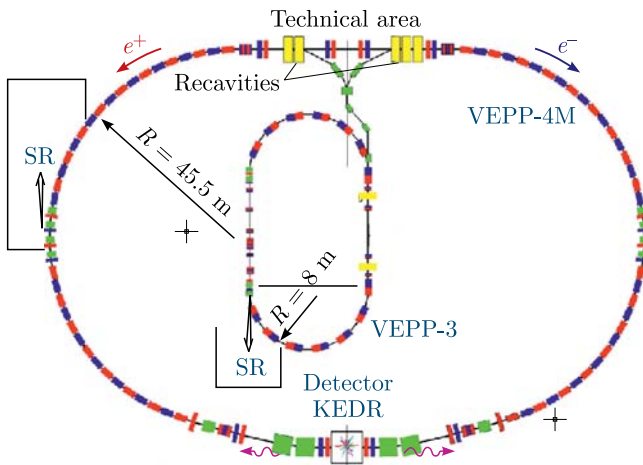


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Схема ВЭПП-4М

Для измерений продольного распределения частиц в пучке стрик-камера PN-01/S20, разработанная в ИОФ РАН, была установлена в систему оптической диагностики ВЭПП-4М [8]. Место установки показано красной стрелкой на рис. 1.

Основные параметры стрик-камеры представлены в таблице.

Основные параметры стрик-камеры

Параметр	Значение
Спектральный диапазон фотокатода, нм	350–1300
Длительность развертки, нс	200/100/30/10/1,5/0,75/0,25
Временное разрешение, пс	~ 1
Временная нелинейность разверток, %	Не более 10
Нестабильность срабатывания, %	Не более 3
Максимальная частота запуска, кГц	1

Для исключения возможного влияния насыщения микроканальной пластины (МКП) стрик-камеры на форму регистрируемого профиля пучка была проверена линейность передачи интенсивности стрик-камерой при варьировании коэффициента усиления МКП. Для этого была проверена линейность полной интенсивности изображения на люминофоре от тока пучка. Кроме того, проверялось отсутствие существенных отклонений яркости и формы изображения в зависимости от его положения на люминофоре. Результаты этой проверки представлены на рис. 2. Камера тестировалась при различных коэффициентах усиления МКП, которые менялись в условных единицах от 5 до 11.

Результаты измерений позволяют сделать вывод, что независимо от коэффициента усиления МКП интенсивность свечения люминофора линейно зависит от интенсивности синхротронного излучения. Кроме того, проверено отсутствие зависимости интенсивности изображения на люминофоре от его положения. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что стрик-камера работает в линейном режиме.

Измерения в одинаковых режимах работы установки проводились в нескольких заходах, однако ширина аппаратной функции стрик-камеры на полувысоте всегда не превышала 0,35 см в единицах длины пучка, что является пренебрежимо малым

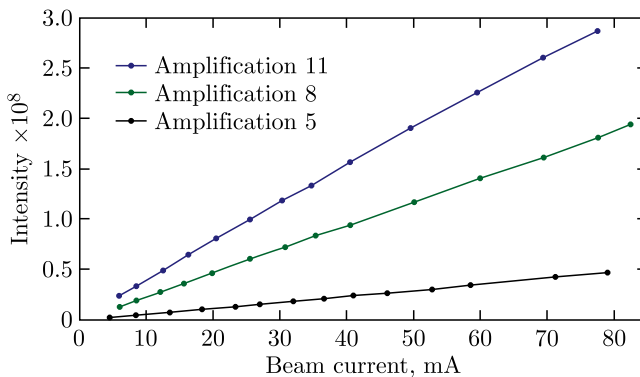


Рис. 2. Проверка линейности стрик-камеры

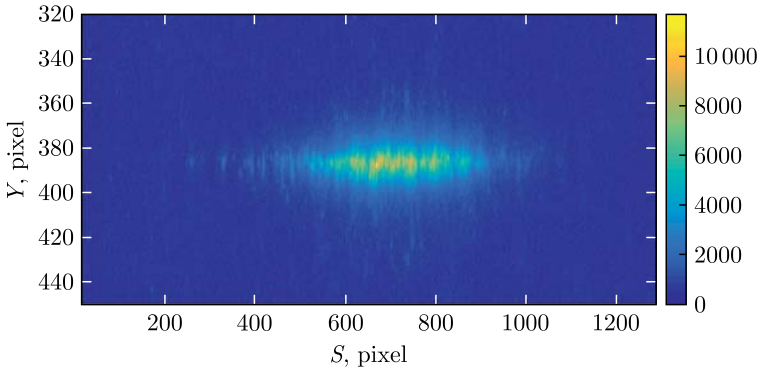


Рис. 3. Пример зарегистрированного стрик-камерой продольного профиля пучка. $I_b = 0,3$ мА

значением в сравнении с шириной регистрируемых профилей. На рис.3 показано исходное изображение пучка, зарегистрированное стрик-камерой при токе пучка $I_b = 0,3$ мА. Это близко к минимально возможной величине тока, при которой проводились измерения.

Изображение на рис.3 имеет ряд типичных особенностей. Заметны небольшие «шумовые» точки, а также перепады интенсивности в профиле пучка. Эти перепады

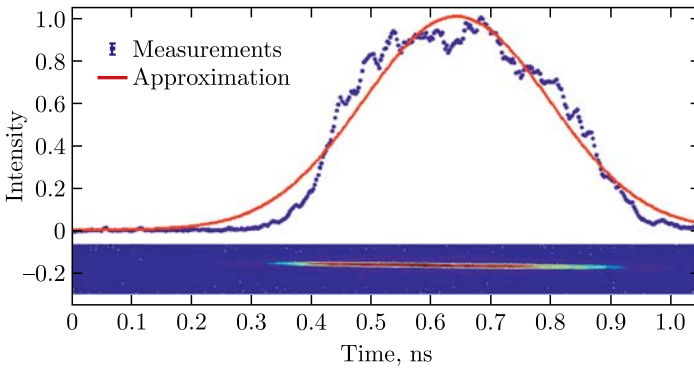


Рис. 4. Профиль пучка при токе 4,92 мА

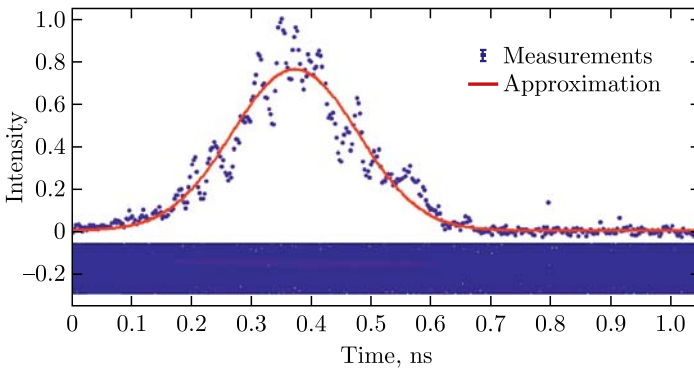


Рис. 5. Профиль пучка при токе 0,27 мА

объясняются неоднородностью люминофора, а также структурой МКП. Для получения продольного распределения интенсивности проводилось интегрирование сигнала по вертикальной координате. Полученное таким образом распределение (рис. 4, 5) хорошо аппроксимируется гауссовым распределением с параметром $\sigma = (3,71 \pm 0,11)$ см.

Ниже на рисунках представлены примеры данных, полученных с помощью стрик-камеры на энергии ВЭПП-4М $E = 1865$ МэВ при максимальном и минимальном токе пучка в этой серии измерений.

По данным, представленным на рис. 4, хорошо заметно искажение формы пучка, вызванное коллективными эффектами, которое вносит дополнительную сложность в определение продольного размера пучка. В то же время на рис. 5 видно, что при малом токе наблюдаются большие шумы на профиле, связанные со статистикой фотоэлектронов, которые также затрудняют определение продольного размера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ИМПЕДАНСОВ СВЯЗИ НА ПРОДОЛЬНЫЙ РАЗМЕР ПУЧКА В ВЭПП-4М

Для определения продольного импеданса коллайдера ВЭПП-4М были измерены зависимости продольного размера пучка от тока. Примеры полученных зависимостей представлены на рис. 6 и 7.

Также на этих графиках представлен результат аппроксимации полученных данных зависимостью от тока пучка вида $\sigma_s \propto I_b^{1/3}$, характерной для продольной микроволновой неустойчивости.

Для определения импеданса необходимо вначале проанализировать полученные зависимости продольного размера пучка от его тока. Так как существует несколько эффектов, влияющих на продольный размер пучка, то и удлинение пучка может быть вовсе не связано с продольной микроволновой неустойчивостью. По измеренным на энергиях 3,5 ГэВ и выше зависимостям продольного размера пучка от тока видно, что при малых токах пучка зависимость длины от тока слабая и не аппроксимируется зависимостью $\sigma_s \propto I_b^{1/3}$, характерной для продольной микроволновой неустойчивости, и точно так же не аппроксимируется зависимостью вида $\sigma_s \propto I_b^{1/6}$, характерной для

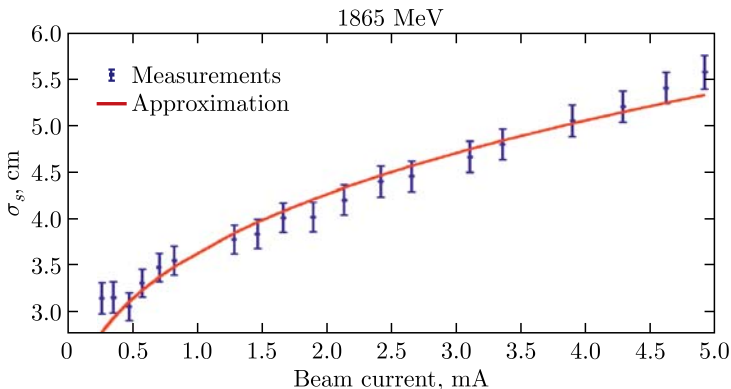


Рис. 6. Зависимость продольного размера пучка от тока на энергии 1865 МэВ

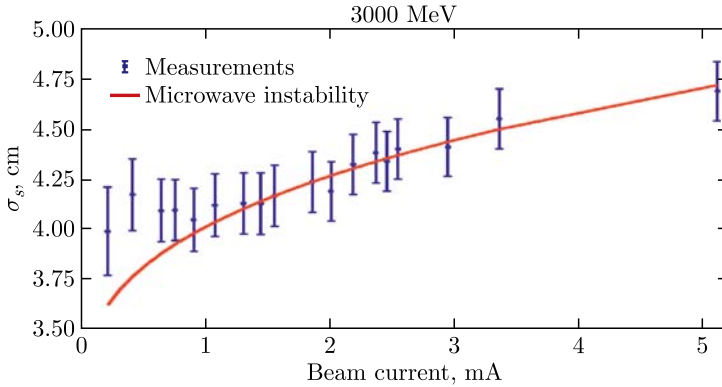


Рис. 7. Зависимость продольного размера пучка от тока на энергии 3000 МэВ

многократного внутрисгусткового рассеяния [9]. Поэтому можно сделать вывод, что изменение размера в данном случае сопоставимо с точностью измерений. Из этого можно дать оценку сверху для величины $\text{Im}[(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}] \approx (-2 \pm 0,7)$ Ом. Так же сделана проверка по зависимости, полученной на энергии 3,5 и 3 ГэВ (рис. 8, 9), где влияние продольной микроволновой неустойчивости наблюдается при токе, большем 1 мА. Ниже представлены результаты аппроксимации этих зависимостей с помощью формул (2) и (5).

Из графиков на рис. 8 и 9 следует, что такая оценка влияния эффекта искажения потенциальной ямы согласуется с экспериментальными данными на энергии 3 и 3,5 ГэВ. С учетом оценки влияния эффекта искажения потенциальной ямы, по измеренным зависимостям было определено значение $|Z_{\parallel}/n|_{BB} = (7,9 \pm 1,4)$ Ом.

Был проведен, кроме того, эксперимент, целями которого являлось точное определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы и проверка достоверности полученных значений импеданса. Для этого на энергии инжекции (1900 МэВ) про-

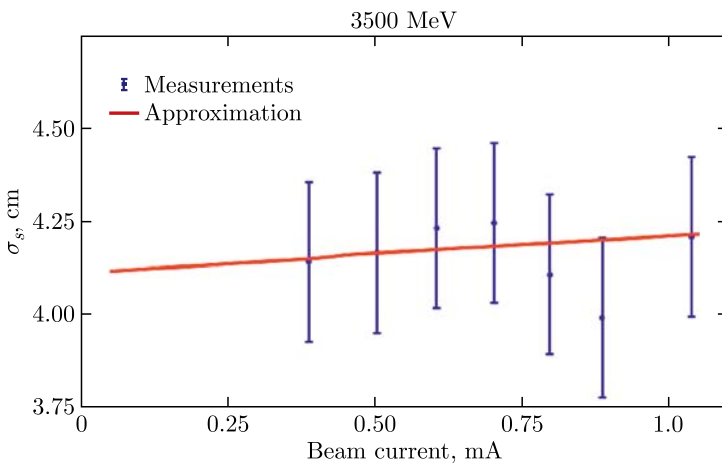


Рис. 8. Пример оценки влияния эффекта искажения потенциальной ямы

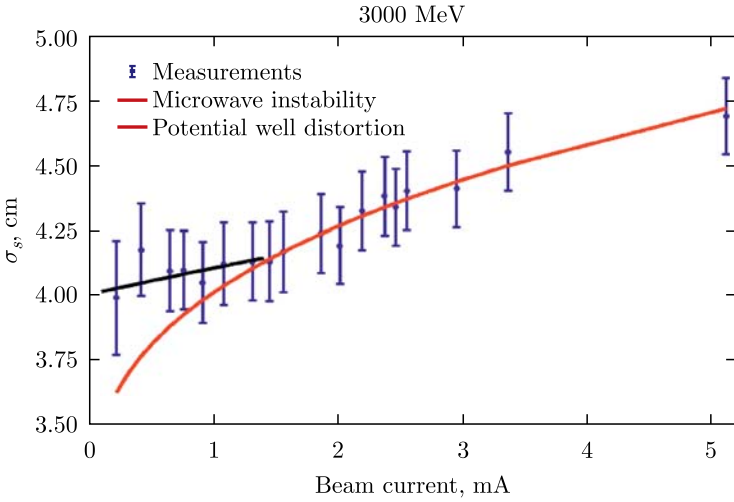


Рис. 9. Проверка корректности учета влияния эффекта искажения потенциальной ямы на энергии 3 ГэВ

ведена серия измерений с различными значениями энергетического разброса пучка (энергетический разброс контролировался изменением тока в трехполюсном вигглере), что позволило управлять положением порогового тока продольной микроволновой неустойчивости. Для точного определения вклада эффекта искажения потенциальной ямы был использован режим с полностью включенным вигглером (пороговый ток неустойчивости максимален (рис. 10)). С использованием полученных по предыдущим измерениям значения широкополосного импеданса был оценен пороговый ток микроволновой неустойчивости, равный примерно 10 мА, все измерения велись при меньшем токе. Аппроксимация формулой (2) проводилась следующим образом. Выбиралось значение σ_{s0} , затем строилась зависимость величины $(\sigma_s/\sigma_{s0})^3 - (\sigma_s/\sigma_{s0})$ от

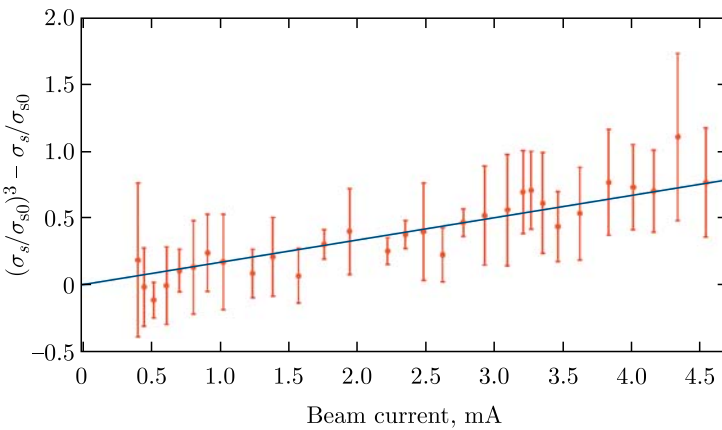


Рис. 10. Определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы. Вигглер включен полностью

тока пучка, после чего данная зависимость аппроксимировалась линейной зависимостью вида

$$y = kI_b, \quad y = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right), \quad k = -\frac{\alpha \operatorname{Im} \left[\left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right)_{\text{eff}} \right]}{\sqrt{2\pi}EQ_{s0}^2} \left(\frac{R}{\sigma_{s0}}\right)^3. \quad (6)$$

Методом наименьших квадратов выбиралось лучшее приближение из всех значений σ_{s0} , после чего из коэффициента k определялась величина $\operatorname{Im} [(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}]$. Полученное значение $\operatorname{Im} [(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}] = (-2,1 \pm 0,4)$ Ом согласуется с полученной ранее оценкой в пределах точности измерений.

Для проверки корректности учета влияния обоих эффектов было проведено измерение зависимости продольного размера пучка от его тока в промежуточном режиме (ток вигглера равен половине максимального значения). В таком режиме плотность частиц в пучке увеличена по сравнению с режимом полностью включенного вигглера вследствие уменьшения энергетического разброса частиц в пучке. При этом коллективные эффекты заметнее влияют на движение частиц в ускорителе, однако влияние все еще существенно ослаблено по сравнению с режимом, когда вигглер выключен.

На рис. 11 представлены результаты этого измерения с нанесением расчетных зависимостей для каждого из эффектов. Красными точками обозначены измеренные значения продольного размера пучка, зеленой линией (2) показана зависимость продольного размера пучка от его тока при учете только эффекта искажения потенциальной ямы, а синяя кривая (1) соответствует размеру пучка, определяемому продольной микроволновой неустойчивостью. Видно, что измеренные размеры пучка хорошо сопоставляются с расчетными, и при токе примерно 3 мА продольный размер пучка хорошо описывается уравнением продольной микроволновой неустойчивости. Ниже значения порогового тока продольный размер описывается уравнением, соответствующим эффекту искажения потенциальной ямы.

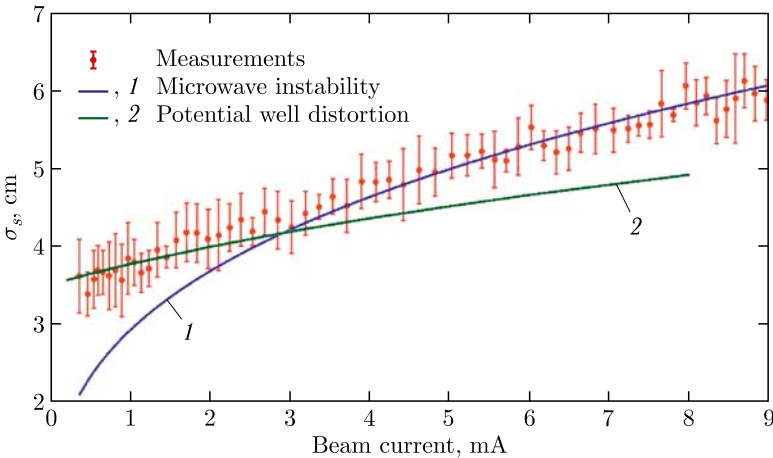


Рис. 11 (цветной в электронной версии). Определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы. Ток в вигглере уменьшен в два раза по сравнению со случаем, показанным на рис. 10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы изучено влияние эффектов искажения потенциальной ямы и продольной микроволновой неустойчивости на продольный размер пучка коллайдера ВЭПП-4М. Измерены зависимости продольного размера пучка от его тока, по измеренным зависимостям определен продольный импеданс коллайдера ВЭПП-4М. По найденным значениям импеданса проведены расчеты удлинения сгустка в нескольких режимах на энергии 1900 МэВ, отличающихся различным энергетическим разбросом. Данная модель хорошо предсказывает поведение продольного размера пучка, что позволяет провести измерения энергетического разброса пучка ВЭПП-4М с учетом эффектов удлинения пучков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90138.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chao A.* Physics of Collective Beam Instabilities. New York: Wiley, 1993.
2. *Смалюк В. В.* Подавление неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях. Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2010.
3. *Sands M.* The Physics of Electron Storage Rings: An Introduction. SLAC Report 121. 1971. 190 p.
4. *Wiedemann H.* Particle Accelerator Physics. 3rd ed. Berlin: Springer, 2007. 948 p.
5. *Смалюк В. В.* Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43, вып. 2. С. 401.
6. *Chao A. W., Tigner M.* Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Singapore: World Sci., 1999.
7. *Borin V. M. et al.* Measurements of VEPP-4M Collider Energy Spread in Full Energy Range // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 3. P. 276–289.
8. *Piminov P.* Status of the Electron–Positron Collider VEPP-4 // Proc. of IPAC. 2017. P. 2985–2988.
9. *Le Duff J.* Single and Multiple Touschek Effects // Proc. of CERN Accel. School, Rhodes, Greece, 1993. Geneva: CERN, 1995. P. 573–586.

Получено 29 сентября 2022 г.