

## **ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА НАГРУЗКИ ПУЧКОМ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ СГУСТКОВ ПО ТУШЕКУ В НАКОПИТЕЛЕ ЦКП «СКИФ»**

*М. А. Байструков<sup>а, б, 1</sup>, М. А. Скамароха<sup>а, б</sup>,  
П. А. Пиминов<sup>а, б</sup>, Е. А. Ротов<sup>а, б</sup>, Н. В. Митянина<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»  
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН,  
Кольцово, Россия

В настоящее время в Новосибирске ведется строительство источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ». Его особенностью является малый эмиттанс при высоком токе пучка. Коллективные эффекты в установках с интенсивным пучком весьма разнообразны. Один из них — это эффект нагрузки пучком ускоряющих резонаторов. Этот эффект определяется импедансом основной моды резонаторов и режимом заполнения сепаратрис. Данная работа посвящена влиянию эффекта нагрузки пучком резонаторов на время жизни сгустков по Тушкеу в кольце накопителя ЦКП «СКИФ». Проведены аналитические расчеты данного эффекта для основного режима заполнения кольца накопителя. Показано, что сгустки в этом режиме имеют заметно различающееся время жизни по Тушкеу. Также показано, что при увеличении ВЧ-акцептанса этот эффект может ослабевать и становиться малым при ВЧ-акцептансе, равном энергетическому акцептансу установки.

Currently, the construction of 4+ generation synchrotron radiation source “SKIF” is underway in Novosibirsk. Its distinctive feature is a low emittance at a high beam current. Collective effects in storage rings with high intensity beams are quite diverse. One of them is the effect of beam loading of accelerating RF cavities. This effect is determined by the impedance of the fundamental mode of the RF cavities and the mode of filling pattern. We investigate the influence of the beam loading effect on the Touschek lifetime of bunches in the storage ring of SRF “SKIF”. Analytical calculations of this effect for the fundamental mode of filling the storage ring are performed. It is shown that bunches in this mode have distinctly different Touschek lifetimes. It is also shown that with an increase in the RF acceptance, this effect can weaken and become small with the RF acceptance equal to the energy acceptance of the storage ring.

PACS: 29.20.D—; 29.20.db; 29.27.—a

---

<sup>1</sup>E-mail: M.A.Baistrukov@inp.nsk.su

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН является единственным исполнителем комплекса работ по изготовлению, сборке, поставке и пусконаладке технологически сложного оборудования нового источника синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ ЦКП «СКИФ». Ключевыми особенностями нового источника СИ являются постоянная работа на токе пучка 400 мА при энергии частиц 3 ГэВ, ультрамалый проектный эмиттанс 73 пм и высокая яркость [1–3]. При такой интенсивности пучка становятся крайне важными коллективные эффекты — эффекты, связанные с однократным и многократным рассеянием между частицами, а также взаимодействием электромагнитных полей, возбужденных пучком внутри вакуумной камеры, с частицами этого же пучка.

Многократное кулоновское рассеяние частиц в сгустке, называемое внутрисгустковым рассеянием, приводит к уменьшению яркости вследствие увеличения фазового объема, в зависимости от интенсивности сгустка. Однократные кулоновские рассеяния на большие углы пар частиц в сгустке, приводящие к резкому изменению продольного импульса частиц и, как следствие, их выходу за границы устойчивой области движения, называются эффектом Тушека. Эффект Тушека ограничивает время жизни пучка и приводит к росту радиационного фона вокруг накопителя. Время, за которое число частиц в пучке уменьшится в два раза из-за эффекта Тушека [4], мы называем в этой работе временем жизни по Тушеку. Эта характеристика зависит от интенсивности и энергии пучка, а также от энергетического акцептанса накопителя частиц, который в первую очередь определяется конфигурацией магнитной структуры и настройкой ВЧ-системы.

Взаимодействие пучка с вакуумной камерой через электромагнитные поля характеризуется импедансом. Эффекты, возникающие из-за ненулевого импеданса вакуумной камеры, весьма разнообразны. Есть как продольные, так и поперечные эффекты. В свою очередь, возбуждаемые пучком электромагнитные поля могут быть как короткоживущими, к примеру, поля от индуктивного импеданса, так и долгоживущими, к примеру, поля от резонансного импеданса. Наибольший резонансный импеданс имеет основная мода ускоряющей ВЧ-системы. Эффект взаимодействия пучка с импедансом основной моды резонатора, приводящий к изменению равновесного состояния сгустков в системе, называется эффектом нагрузки пучком резонаторов.

В данной работе мы рассмотрим влияние только эффекта нагрузки пучком резонаторов на время жизни сгустков по Тушеку. Естественно, в реальности, помимо этого эффекта, будет также множество других. Однако если говорить о продольных эффектах, таких как импедансное удлинение сгустка, внутрисгустковое рассеяние и микроволновая неустойчивость, то они возникают в масштабах одного сгустка, в то время как эффект нагрузки пучком резонаторов имеет масштаб пучка. Поэтому эти эффекты можно рассматривать независимо.

В накопителе ЦКП «СКИФ» планируется в качестве основного режима заполнения сепаратрис использовать режим с разрывом пучка. В свою очередь, такие режимы заполнения приводят к модуляции ускоряющего напряжения на протяжении периода обращения пучка. Эта модуляция напряжения приводит к смещению сгустков по фазе, изменению равновесной длины и ВЧ-акцептанса от сгустка к сгустку. Как следствие, сгустки в пучке имеют разное время жизни по Тушеку. В свою очередь, эффект

Тушека является определяющим для времени жизни сгустков, при высоком вакууме в камере накопителя.

В разд. 1 мы приводим теорию для расчета равновесной формы сгустков и ВЧ-акцептанса с учетом эффекта нагрузки пучком ускоряющих резонаторов. Также мы тезисно приводим теорию для расчета эффекта Тушека. В разд. 2 мы приводим параметры накопителя ЦКП «СКИФ» и результаты расчетов для основного режима заполнения сепаратрис. В заключении подводим итоги работы и делаем выводы о влиянии рассмотренного эффекта на работу ЦКП «СКИФ».

## 1. ТЕОРИЯ

Существуют разные способы определить wake-функцию и импеданс [5–7]. В данной работе мы будем полагать, что продольная wake-функция  $W(t)$  зависит от времени  $t$ , при этом  $W(t) = 0$  для  $t < 0$ , а также, что  $W(0^+) \geq 0$ . Поперечные размеры сгустков малы, так что мы пренебрежем изменением продольной wake-функции и импеданса от поперечной координаты.

Продольный импеданс  $Z(\omega)$  связан с wake-функцией прямым преобразованием Фурье:

$$Z(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (1)$$

Период обращения пучка и циклическую частоту обращения обозначим  $T_0$  и  $\omega_0$  соответственно. Пусть пучок на одном периоде обращения имеет стационарную продольную форму  $\lambda_b(t)$ . При этом  $\int_{-\infty}^{\infty} \lambda_b(t) dt = 1$ . Тогда wake-потенциал от продольно распределенного заряда  $V(t)$ :

$$V(t) = \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z(\omega_p) \tilde{\lambda}_b(\omega_p) e^{i\omega_p t}, \quad (2)$$

где  $\omega_p = p\omega_0$ , а  $\tilde{\lambda}_b(\omega)$  — прямое преобразование Фурье от  $\lambda_b(t)$ . Наведенное пучком напряжение  $U_b(t) = -q_b V(t)$ , где  $q_b$  — полный заряд пучка. В свою очередь,  $q_b = I_0 T_0$ , где  $I_0$  — полный ток пучка. Таким образом, наведенное пучком напряжение:

$$U_b(t) = -I_0 \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z(\omega_p) \tilde{\lambda}_b(\omega_p) e^{i\omega_p t}. \quad (3)$$

Строго говоря, в накопителе будет циркулировать пучок электронов, но для простоты будем полагать, что заряд пучка и ток положительны. Тогда положительное напряжение будет соответствовать приобретению электронами энергии, а отрицательное — потере энергии.

Будем рассматривать простейшую модель продольного движения [8]. Частицу будем характеризовать отклонением от равновесной частицы по времени  $\tau$  и относи-

тельным отклонением от равновесной частицы по энергии  $\delta$ :

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \eta\delta, \\ \frac{d\delta}{dt} = \frac{eU(t) - W_0}{E_0T_0}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $\eta$  — коэффициент удлинения периода обращения (slip factor),  $e$  — элементарный заряд,  $W_0$  — потеря частицей энергии на излучение за один оборот и  $E_0$  — равновесная энергия электронов. В нашем случае с очень хорошей точностью  $\eta = \alpha_c$ , где  $\alpha_c$  — коэффициент уплотнения орбит (momentum compaction factor).  $U(t)$  — ускоряющее напряжение. Оно складывается из напряжения  $U_g(t)$ , которое создают генераторы на резонаторах, и напряжения  $U_b(t)$ , которое наводит пучок на кольцо накопителя.

Для системы (4) можно построить гамильтониан  $H(\tau, \delta)$ , опираясь на то, что

$$\begin{cases} \frac{\partial H(\tau, \delta)}{\partial \tau} = -\frac{d\delta}{dt}, \\ \frac{\partial H(\tau, \delta)}{\partial \delta} = \frac{d\tau}{dt}. \end{cases} \quad (5)$$

Если инкременты всех неустойчивостей меньше, чем декременты радиационных затуханий, то под действием квантовых флуктуаций сгусток приходит к равновесному состоянию. В этом случае продольная функция распределения сгустка  $\psi(\tau, \delta)$  будет функцией от гамильтониана:

$$\psi(\tau, \delta) = A e^{-\frac{H(\tau, \delta)}{\eta\sigma_\delta^2}}, \quad (6)$$

где  $A$  — нормировочный коэффициент, а  $\sigma_\delta$  — относительный разброс энергии в сгустке.

Проинтегрировав функцию распределения (6) по  $\delta$ , получим равновесную продольную форму сгустка:

$$\lambda_s(\tau) = A_p e^{-\frac{H_p(\tau)}{\eta\sigma_\delta^2}}, \quad (7)$$

где  $A_p$  — нормирующий коэффициент для продольной формы сгустка, а  $H_p(\tau)$  — потенциальная часть гамильтониана. Найдем вклад в  $H_p(\tau)$  от наведенного пучком напряжения (3) и обозначим его  $H_b(\tau)$ . Для этого проинтегрируем соответствующее уравнение системы (5), используя (3) и (4):

$$H_b(\tau) = \frac{eI_0}{E_0T_0} \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z(\omega_p) \tilde{\lambda}_b(\omega_p) \frac{e^{i\omega_p\tau}}{i\omega_p}. \quad (8)$$

Введем циклическую частоту генератора основной ВЧ-системы  $\omega_g = N\omega_0$ . Суммарное напряжение от генераторов  $U_g(t) = \text{Re}(\hat{U}_g e^{i\omega_g t})$ , где  $\hat{U}_g$  — комплексная амплитуда напряжения от генераторов. Вклад генераторов  $H_g(\tau)$  в потенциальную часть гамильтониана  $H_p(\tau)$  следующий:

$$H_g(\tau) = -\frac{e}{2\pi N E_0} \text{Im}(\hat{U}_g e^{i\omega_g \tau}). \quad (9)$$

Запишем  $H_p(\tau)$  через ее составляющие:

$$H_p(\tau) = H_b(\tau) + H_g(\tau) + \frac{W_0\tau}{E_0T_0}. \quad (10)$$

Последнее слагаемое появляется из-за потери энергии на СИ. Соответственно, самоогласованная система уравнений (7)–(10) определяет равновесную форму сгустков. При этом каждый сгусток пучка влияет на все остальные. Когда ток пучка пренебрежимо мал, форму сгустка определяют потери на СИ, равновесный энергоразброс  $\sigma_\delta$  и напряжение генераторов  $\hat{U}_g$ . При повышении тока важную роль начинает играть продольный импеданс вакуумной камеры. В какой-то момент повышение тока приводит к возникновению микроволновой неустойчивости, которая увеличивает равновесный  $\sigma_\delta$ . В свою очередь, импеданс можно разбить на ближкодействующий и дальнодействующий. Ближкодействующий импеданс приводит к возникновению заметных полей только в пределах одного сгустка. Дальнодействующий приводит к возникновению медленно затухающих полей, которые видят все сгустки пучка.

Хотя эффекты от ближкодействующего и дальнодействующего импедансов и влияют друг на друга, но это влияние крайне мало, и мы можем рассматривать эти эффекты независимо. В данной работе ограничимся эффектом, возникающим из-за резонансного импеданса основной моды ускоряющих резонаторов накопителя ЦКП «СКИФ», полагая, что остальными модами резонатора можно пренебречь, так как они сильно подавлены.

Импеданс основной моды резонатора имеет форму [5–7]

$$Z_r(\omega) = \frac{\rho Q}{1 + iQ \left( \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)}, \quad (11)$$

где  $\rho$  — характеристическое сопротивление;  $Q$  — добротность резонатора, а  $\omega_r$  — собственная круговая частота резонатора. В данной работе будем рассматривать только основную моду ускоряющей ВЧ-системы. Из-за того что резонаторы связаны с генераторами, при расчетах следует использовать нагруженную добротность  $Q_l$  вместо собственной добротности резонатора.

Резонансная частота  $\omega_r$  в резонаторе выбирается ниже, чем частота генератора  $\omega_g$ . Это позволяет подавить неустойчивость робинсоновского типа для синфазной моды колебаний и уменьшить реактивную мощность генератора. Введем отстройку резонатора  $\delta\omega$  так, что  $\omega_r = \omega_g + \delta\omega$ . Существует оптимальная отстройка  $\delta\omega_0$  [8]:

$$\delta\omega_0 \approx -\omega_g \frac{\rho I_0}{U_0} \sin \varphi_s, \quad (12)$$

где  $\varphi_s$  — синхронная фаза для косинусоидального напряжения, а  $U_0$  — амплитуда суммарного напряжения на резонаторах. Отстройка  $\delta\omega_0$  находится из предположения, что в накопителе заполнены все сепаратрисы и что реактивная мощность генераторов равна нулю.

Иногда наводимое пучком напряжение при оптимальной отстройке настолько велико, что возникает статическая неустойчивость. По своей сути это условие на неустойчивое равновесие по синфазной моде многосгустковых неустойчивостей. Для

ее подавления необходимо, чтобы выполнялось условие  $\text{Im}(\hat{U}_g) > 0$ . В свою очередь, если ввести комплексное напряжение на резонаторах  $\hat{U}_0 = U_0 e^{i\varphi_s}$ , то для полного заполнения сепаратрис  $\hat{U}_g = \hat{U}_0 + 2I_0 Z_r(\omega_g)$ . Соответственно, получаем условие на мнимую часть импеданса на частоте генератора:

$$-\text{Im}(Z_r(\omega_g)) < \frac{\text{Im}(\hat{U}_0)}{2I_0}. \quad (13)$$

Отстройку резонатора выбираем так, чтобы условие (13) было выполнено.

Любое заполнение сепаратрис с разрывом приводит к модуляции напряжения на резонаторах ВЧ-системы. Это, в свою очередь, приводит к продольным сдвигам сгустков и к изменению ВЧ-акцептанса для каждого сгустка пучка. ВЧ-акцептанс — это отклонение по энергии, которое должно быть у частицы, чтобы она вылетела за пределы сепаратрисы продольного движения. Учитывая, что гамильтониан  $H(\tau, \delta) = \eta\delta^2/2 + H_p(\tau)$ , для сгустка с номером  $n$  получим ВЧ-акцептанс  $\delta_n$ :

$$\delta_n = \sqrt{\frac{2}{\eta} (H_p(\bar{\tau}_n) - H_p(\tau_n))}, \quad (14)$$

где  $\tau_n$  — положение минимума потенциальной части гамильтониана на сепаратрисе с номером  $n$ , а  $\bar{\tau}_n$  — положение максимума. Оба положения находятся из условия  $eU(\tau_n) = eU(\bar{\tau}_n) = W_0$ . В случае маленького тока все сепаратрисы эквиваленты, и получаем одинаковый для всех сгустков ВЧ-акцептанс

$$\delta_{\text{RF}} = \sqrt{\frac{2(eU_0 \sin \varphi_s - W_0 \varphi_s)}{\eta \pi N E_0}}. \quad (15)$$

Кулоновское рассеяние заряженных частиц в накопленном пучке приводит к перераспределению энергии между поперечным и продольным движением. Эффект Тушека является одним из следствий такого процесса и заключается в том, что малый поперечный импульс столкнувшихся частиц преобразуется в большой продольный импульс. В результате обе рассеянные частицы перестают совершать устойчивое движение и теряются на стенках вакуумной камеры, одна частица имеет слишком большую энергию, другая слишком маленькую. Усиление импульса при преобразовании — это релятивистский эффект, так что изменение продольного импульса усиливается пропорционально лоренц-фактору  $\gamma$ . В работе [4] выведена формула для времени жизни по Тушеку:

$$\frac{1}{T_l} = \left\langle \frac{r_p^2 c N_p}{8\pi\gamma^2 \sigma_s \sqrt{\sigma_x^2 \sigma_z^2 - \sigma_p^4 D_x^2 D_z^2} \zeta_m} F(\zeta_m, B_1, B_2) \right\rangle, \quad (16)$$

где скобки обозначают усреднение по периметру накопителя;  $r_p$  — классический радиус частиц;  $N_p$  — число частиц в пучке;  $c$  — скорость света;  $\sigma_{x,z,s}$  — среднеквадратичные размеры пучка в горизонтальном, вертикальном и продольном направлениях соответственно;  $\sigma_p$  — относительный энергетический разброс;  $D_{x,z}$  — горизонтальная и вертикальная дисперсионные функции;  $\zeta_m = \beta^2 \bar{\delta}_m^2$  с  $\beta$  — относительная скорость

в единицах скорости света;  $\bar{\delta}_m$  — энергетический акцептанс — максимальное относительное отклонение по продольному импульсу, при котором частица совершает устойчивое движение. Функции  $B_{1,2}$  в  $F(\zeta_m, B_1, B_2)$  зависят от оптических функций машины, размеров и энергии пучка. Важно отметить, что энергетический акцептанс  $\bar{\delta}_m$  в зависимости от структуры установки, ее настройки и установленном ВЧ-акцептансе может варьироваться по азимуту [9]. В этом случае для расчета времени жизни энергетический акцептанс необходимо установить из численного моделирования динамики частиц.

## 2. РАСЧЕТЫ

В таблице указаны основные параметры накопителя и ВЧ-системы ЦКП «СКИФ».  $\rho_\Sigma$  соответствует суммарному характеристическому сопротивлению всех ускоряющих резонаторов. С помощью этих параметров были проведены расчеты равновесной продольной формы сгустков на основе уравнений (7)–(10) для нескольких режимов работы.

Параметры накопителя ЦКП «СКИФ»

$T_0$ , мкс	$\alpha_c$	$E_0$ , ГэВ	$N$	$f_g$ , МГц	$\rho_\Sigma$ , Ом	$Q$	$Q_l$
1,5882	$0,764 \cdot 10^{-4}$	3	567	357,00	712,5	16000	3200

На данный момент предполагается, что в основном варианте заполнения сепаратрис пучок будет состоять из 500 идущих подряд сгустков и разрыва в 67 сепаратрис. Соответственно все расчеты проведены для данного режима заполнения.

При разных потерях энергии на СИ за оборот, но одинаковом ВЧ-акцептансе эффект отличается довольно слабо, поэтому для расчетов были выбраны две точки:  $W_0 = 531,39$  кэВ и  $W_0 = 786,67$  кэВ. Эти точки соответствуют потерям только на поворотных магнитах и потерям на поворотных магнитах и устройствах первой очереди соответственно. Расчетный относительный разброс энергии в первом случае составит  $\sigma_\delta = 1,032 \cdot 10^{-3}$ , а во втором —  $\sigma_\delta = 1,169 \cdot 10^{-3}$ .

С помощью программы elegant [10, 11] для проектирования ускорителей и моделирования динамики заряженных частиц проведено моделирование для поиска локального энергетического акцептанса накопителя «СКИФ» для структур без вставных устройств и со вставными устройствами первой очереди. По результатам моделирования на рис. 1 видно, что энергетический акцептанс в обоих случаях до 3% определяется ВЧ-акцептансом, с 3 до 4% энергетический акцептанс локально ограничен в поворотных магнитах суперпериодов. Это стало причиной выбора для расчетов в этой работе значений ВЧ-акцептанса  $\delta_{RF}$  в 3, 3,5 и 4%. Эти значения как раз находятся ниже и на уровне расчетного энергетического акцептанса в поворотных магнитах установки.

Для всех значений  $W_0$  и  $\delta_{RF}$  были рассчитаны равновесные продольные формы сгустков при токе пучка 400 мА, что соответствует максимальному расчетному току пучка. На основе этих форм для каждого сгустка пучка была вычислена длина и ВЧ-акцептанс. С использованием полученных величин для каждого сгустка было рассчитано время жизни по Тушеку. Для расчета времени жизни также были использованы оптические функции.

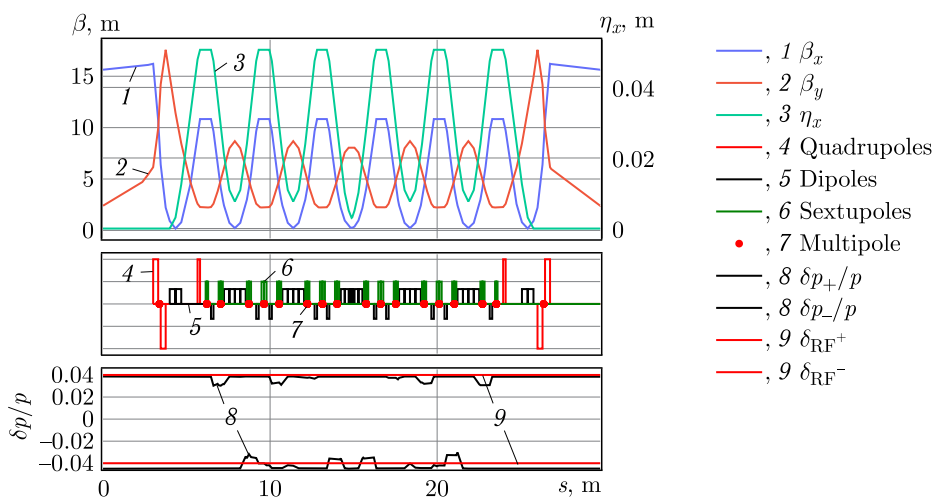


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Оптические функции и локальный энергетический акцептанс суперпериода накопителя ЦКП «СКИФ»

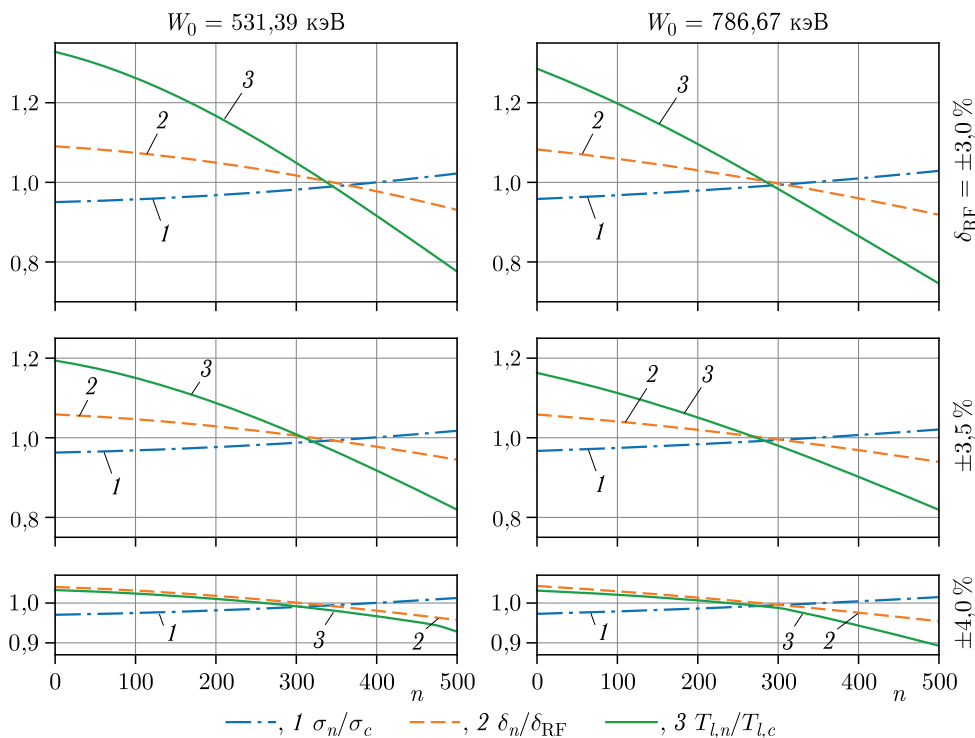


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Зависимости от номера сгустка длины сгустков, ВЧ-акцептанса и времени жизни по Тушеку в относительных величинах, соответствующих расчетам без учета импеданса.  $\sigma_c$  — среднеквадратичная длина сгустка без учета импеданса,  $T_{l,c}$  — время жизни по Тушеку без учета импеданса,  $n$  — номер сгустка



На рис. 2 приведены полученные зависимости для каждого из рассмотренных вариантов. Для простоты восприятия каждая величина была обезразмерена на соответствующее значение, полученное без учета импеданса. Также важно понимать, что величины  $\sigma_c$  и  $T_{l,c}$  имеют разное значение для разных  $W_0$  и  $\delta_{RF}$ , однако эти величины опущены, так как они не имеют значение в рамках данной работы. Как видно из рисунка, для любого режима характерно, что от первого сгустка пучка к последнему длина сгустков увеличивается, а ВЧ-акцептанс уменьшается. Это характерное поведение, связанное с модуляцией ускоряющего напряжения пучком. Каждый следующий сгусток забирает небольшую порцию энергии у резонатора, что приводит к незначительному уменьшению амплитуды напряжения на резонаторе. Меньшая амплитуда соответствует большей длине сгустка и меньшему ВЧ-акцептансу.

Из-за большого веса ВЧ-акцептанса во времени жизни по Тушеку для малого значения  $\delta_{RF} = 3\%$  зависимость времени жизни от номера сгустка  $n$  довольно резко убывающая. Для первого сгустка  $T_{l,0} = 1,33 T_{l,c}$  и  $T_{l,0} = 1,29 T_{l,c}$  для потерь без и с устройствами первой очереди. Аналогично для последнего сгустка  $T_{l,499} = 0,78 T_{l,c}$  и  $T_{l,499} = 0,75 T_{l,c}$ . При увеличении  $\delta_{RF}$  роль ВЧ-акцептанса ослабевает, поскольку начинает влиять усреднение локального энергетического акцептанса в элементах, где акцептанс ниже соответствующего ВЧ-акцептанса. Соответственно, при  $\delta_{RF} = 3,5\%$  получаем  $T_{l,0} = 1,19 T_{l,c}$  и  $T_{l,0} = 1,16 T_{l,c}$  для первого сгустка при меньшем и большем  $W_0$  и  $T_{l,499} = 0,82 T_{l,c}$  для каждого из двух режимов потерь. Когда  $\delta_{RF}$  приближается к энергетическому акцептансу установки, зависимость времени жизни по Тушеку от номера сгустка становится относительно слабой. При  $\delta_{RF} = 4\%$  получаем  $T_{l,0} = 1,03 T_{l,c}$  для каждого из двух  $W_0$ , а  $T_{l,499} = 0,93 T_{l,c}$  и  $T_{l,499} = 0,89 T_{l,c}$  для потерь без и с устройствами первой очереди.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитано влияние эффекта нагрузки пучком резонаторов на время жизни по Тушеку для основной схемы заполнения накопителя ЦКП «СКИФ». В результате расчетов выяснено, что вдоль пучка от первого сгустка к последнему увеличивается длина сгустков и уменьшается ВЧ-акцептанс. Это, в свою очередь, приводит к резкой зависимости времени жизни по Тушеку от номера сгустка при малом ВЧ-акцептансе. Причем время жизни уменьшается вдоль пучка.

При увеличении ВЧ-акцептанса эффект ослабевает и, когда ВЧ-акцептанс приближается к энергетическому акцептансу установки, становится мал. В этом случае время жизни по Тушеку зависит от ВЧ-акцептанса заметно слабее и не так сильно меняется вдоль пучка.

Соответственно в основном режиме работы накопителя ЦКП «СКИФ», когда ВЧ-акцептанс больше или равен энергетическому акцептансу установки, эффект изменения времени жизни по Тушеку вдоль пучка мал и не должен заметно повлиять на работу накопителя. Однако при уменьшении ВЧ-акцептанса эффект должен проявиться на достаточном уровне, что позволит проверить расчеты экспериментально.

Теоретические расчеты будут продолжены с учетом дополнительных факторов и для других вариантов заполнения сепаратрис (неосновных режимов).

**Финансирование.** Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2025-0004).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://srf-skif.ru/>
2. *Baranov G., Bogomyagkov A., Levichev E. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24. P. 120704.
3. *Bukhtiyarov A. V., Bukhtiyarov V. I., Zhuravlev A. N. et al.* Synchrotron Radiation Facility “Siberian Circular Photon Source” (SRF SKIF) // Crystallogr. Rep. 2022. V. 67. P. 690–711; <https://doi.org/10.1134/S1063774522050029>.
4. *Piwinski A.* The Touschek Effect in Strong Focusing Storage Rings. DESY 98-179. 1998.
5. *Khan S.* Collective Phenomena in Synchrotron Radiation Sources. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
6. *Смалюк В. В.* Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях // ЭЧАЯ. 2012. Т. 43, № 2. С. 414.
7. *Chao A. W.* Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators. Wiley Ser. in Beam Physics and Accelerator Technology. 1993.
8. Handbook of Accelerator Physics and Engineering / Ed. A. W. Chao et al. World Sci., 1999.
9. *Streun A.* Momentum Acceptance and Touschek Lifetime. SLS Note 18/97. 1997.
10. *Borland M.* Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation. Advanced Photon Source LS-287. 2000.
11. *Wang Y., Borland M.* Elegant: A Parallel Accelerator Simulation Code for Electron Generation and Tracking // Proc. 12th Advanced Accelerator Concepts Workshop; AIP Conf. Proc. 2006. V. 877. P. 241.

Получено 9 сентября 2024 г.