

Предлагаемый подход был апробирован при дезактивации реального технологического раствора жидких отходов. При этом остаточная активность ^{60}Co была снижена с 700 до 220 Бк·кг⁻¹, что соответствует установленным санитарным нормам. Коэффициент распределения изотопов кобальта(II) между твердой и жидкой фазой при выделении из реальных растворов методом осаждения за одну стадию составляет $>2 \cdot 10^2$. После вытеснения железом(III) из органических комплексов кобальта(II) для выделения последнего из растворов возможно применение также сорбционного метода с использованием титанофосфатных сорбентов [13].

Выводы. Таким образом, в водных средах, не содержащих или содержащих соединения бора высокой концентрации, из комплексов с этилендиаминтетраацетат- или оксалат-ионами катионы кобальта(II) вытесняются катионами железа(III), после чего катионы кобальта могут быть удалены соосаждением с гидроксидом железа без проведения предварительного окислительного разложения органических комплексобразователей. Полнота замещения катионов кобальта(II) катионами железа(III) в исследованных комплексах возрастает с увеличением температуры и продолжительности выдержки растворов, содержащих катионы железа(III). Осаждение при $\text{pH} \geq 12$ способствует почти полному выделению кобальта с гидроксидом железа в осадок.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента России № НШ 6722.2010.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рябчиков Б.Е.** Очистка жидких радиоактивных отходов. М.: ДеЛи принт, 2008.
2. **Епимахов В.Н., Олейник М.С., Панкина Е.Б. и др.** Способ обезвреживания маломинерализованных слабо радиоактивно загрязненных вод в полевых условиях.

- Патент 2158449 РФ, МПК7 G 21 F 9/12, заявл. 22.06.99, 99113475/06. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2010, № 30.
3. **Омельчук В.В., Стахив М.Р., Савкин А.Е. и др.** Разработка технологии и переработка кубовых остатков на Кольской АЭС. — Безопасность окружающей среды, 2007, № 3, с. 34—37.
 4. **Баринов А.С., Ожован М.И., Соболев А.И., Ожован Н.В.** Потенциальная опасность отвержденных радиоактивных отходов. — Радиохимия, 1990, т. 32, № 4, с. 127—131.
 5. **Вишняков Ю.М., Малышев С.П., Пчелинцев В.М., Хорошев В.Г.** Малогабаритная станция комплексной переработки жидких радиоактивных отходов. — Судостроение, 1999, № 3, с. 44—48.
 6. **Ратько А.И., Панасюгин А.С.** Сорбция ^{137}Cs и ^{90}Sr модифицированными сорбентами на основе клиноптилолита. — Радиохимия, 1996, т. 8, № 1, с. 66—68.
 7. **Косяков В.Н., Велешко И.Е., Яковлев Н.Г. и др.** Водорастворимые хитозаны в качестве флокулянтов для дезактивации ЖРО. — Там же, 2003, т. 45, № 4, с. 366—369.
 8. **Локшин Э.П., Иваненко В.И., Удалова И.А., Калинин В.Т.** Физико-химическое обоснование использования TiOHPO_4 для очистки жидких радиоактивных отходов. — Там же, с. 357—361.
 9. **Локшин Э.П., Иваненко В.И., Авсарагов Х.Б., Калинин В.Т.** Дезактивация жидких радиоактивных отходов с повышенным соледержанием. — В сб.: Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты, КНЦ РАН, 2005, с. 160—166.
 10. **Шварценбах Г.** Комплексометрическое титрование. — В сб.: Комплексометрия. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с нем. М.: Гос. научно-техн. изд-во хим. лит-ры, 1958, с. 4—155.
 11. **Селиверстов А.Ф., Ершов Б.Г., Лагунова Ю.О. и др.** Окислительное разложение ЭДТА в водных растворах при действии УФ-излучения. — Радиохимия, 2008, т. 50, № 1, с. 62—65.
 12. **Авраменко В.А., Братская С.Ю., Войт А.В. и др.** Применение проточной гидротермальной технологии переработки концентрированных жидких радиоактивных отходов атомных станций. — Хим. технология, 2009, т. 10, № 5, с. 307—314.
 13. **Иваненко В.И., Локшин Э.П., Владимирова В.В., Авсарагов Х.Б.** Получение титанофосфатных сорбентов из продуктов переработки сфенового концентрата и исследование их свойств. — Журн. прикл. химии, 2005, т. 78, № 1, с. 66—72.

Поступила в Редакцию 24.12.10

УДК 621.384.634.4

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА В СЛАБОТОЧНОМ РЕЖИМЕ

Макулькин А.В. (Гос. космич. научно-производ. центр им. М.В. Хруничева, г. Москва)

Особенностью слабotoчного режима является простота реализации. До начала обсуждения применения слабotoчного режима рассчитана амплитуда эффективного ускоряющего напряжения, учитывающая пролетный фактор

резонатора, и проанализированы методы расчета времени жизни пучка.

Расчет ускоряющего напряжения. В сверхминиатюрном накопительном кольце [1, 2] орбита пучка расположена внутри резонатора

ВЧ-системы, в то время как в обычных накопительных кольцах она проходит через ВЧ-резонаторы.

Амплитуда ускоряющего ВЧ-напряжения $U_{\text{макс}}$ и энергия, получаемая равновесной частицей за один оборот $\Delta E_{\text{об}}$, связаны между собой с помощью известного уравнения

$$\Delta E_{\text{об}} = eU_{\text{макс}} \cos \varphi_0 ,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; φ_0 — фаза равновесной частицы.

В слабофокусирующем ($n = -(R_0/B)(\partial B/\partial r) = 0,01$) сверхминиатюрном накопительном кольце частицы ускоряются с помощью стоячего высокочастотного электрического поля E_y прямоугольного резонатора моды TE_{101}

$$E_y = E_{\text{макс}} \cos \pi x/d \cos \pi z/a \cos \omega_{\text{вч}} t , \quad (1)$$

где $E_{\text{макс}}$ — амплитуда напряженности высокочастотного электрического поля; a, d — размер широкой боковой стенки резонатора; $\omega_{\text{вч}} = 2\pi f_{\text{вч}}$ — угловая резонансная частота ВЧ-поля; $\varphi = \omega_{\text{вч}} t$ — фаза ВЧ-поля. Начало координат x, y, z расположено в центре прямоугольного резонатора. Сгусток частиц, состоящий из $N_{\text{сг}}$ электронов, вращается на орбите с постоянным радиусом кривизны $R_0 = \beta c / \omega_{\text{вч}}$ в горизонтальной медианной плоскости $z = 0$.

Прирост энергии ультрарелятивистской ($\gamma \gg 1, \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}, \beta = v/c, c \sim 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света) равновесной частицы за один оборот

$$\Delta E_{\text{об}} = eE_{\text{макс}} R_0 \int_0^{2\pi} \left[1 - 1/2 \left[\pi R_0/d \cos(\varphi + \varphi_0) \right]^2 \right] \times \cos(\varphi + \varphi_0) \cos(\varphi) d\varphi . \quad (2)$$

Уравнение (2) получено путем замены в выражении (1) — $\cos(\pi x/d) \sim 1 - 1/2(\pi x/d)^2, x = R_0 \cos(\varphi), \cos(\pi z/a) = 1, \varphi = \omega_{\text{вч}} t$. Дополнительно при выводе уравнения (2) учитывалось, что ускоряющей является только азимутальная составляющая напряженности высокочастотного электрического поля $E_\theta = E_y \cos(\varphi)$, направленная по касательной к орбите пучка, а фаза равновесной частицы сдвинута по отношению к фазе высокочастотного поля на угол φ_0 .

После интегрирования по азимутальному углу φ уравнение (2) принимает вид

$$\Delta E_{\text{об}} = e\pi E_{\text{макс}} R_0 \left[1 - 3/8 \pi R_0/d^2 \right] \cos \varphi_0 - 1/4\pi \sin \varphi_0 .$$

С помощью дополнительного угла α проинтегрированное уравнение (2) можно преобразовать к обычному виду

$$\Delta E_{\text{об}} = e\pi E_{\text{макс}} R_0 \left[1 - 3/8 \pi R_0/d^2 \right] \cos \varphi_0 + \alpha = eU_{\text{эф.макс}} \cos \varphi_{0\text{эф}} , \quad (3)$$

где $E_{\text{макс}} = (8QP_{\text{вч}}/\omega_{\text{вч}}\epsilon_0 V)^{1/2}$; Q — добротность резонатора; $P_{\text{вч}}$ — ВЧ-мощность в резонаторе; $V = abd$ — объем резонатора; $\varphi_{0\text{эф}} = (\varphi_0 + \alpha)$ — эффективная фаза равновесной частицы; $\alpha = \arctan \left[4\pi \left[1 - 3/8 \pi R_0/d^2 \right]^{-1} \right] = 5,4^\circ$ для $R_0 = 1,95$ см, $d = 9,5$ см.

Поскольку уравнением (2) была учтена зависимость амплитуды высокочастотного электрического поля от времени, амплитуда эффективного ускоряющего напряжения на орбите пучка $U_{\text{эф.макс}} = \pi E_{\text{макс}} R_0 \left[1 - 3/8 \pi R_0/d^2 \right]$ в уравнении (3) оказалась меньше амплитуды $U_{\text{эф.макс}}^* = 4E_{\text{макс}} R_0 \left[1 - 1/3 \pi R_0/d^2 \right]$ [1] на пролетный фактор резонатора $U_{\text{эф.макс}}/U_{\text{эф.макс}}^* = 0,77$.

В настоящее время большой интерес вызывает исследование генерации коротких сгустков в электронных накопительных кольцах. Среднеквадратичная длина сгустка в накопительном кольце

$$\sigma_L = R_{\text{ср}} \alpha_p f_0/f_s \sigma_E/E ,$$

где $R_{\text{ср}}$ — средний радиус орбиты пучка; α_p — коэффициент уплотнения орбит; f_0, f_s — частота обращения частиц и синхротронных колебаний соответственно; σ_E/E — суммарный относительный среднеквадратичный энергетический разброс частиц; E — энергия электронов. В слабофокусирующих накопительных кольцах с показателем спада магнитного поля на орбите пучка $0 < n < 0,75$ коэффициент уплотнения орбит $\alpha_p = (1 - n)^{-1}$, отношение частоты обращения к частоте синхротронных колебаний $f_0/f_s = [2\pi E(1 - n)(heU_{\text{макс}} \cos \varphi_0)^{-1}]^{1/2}$, где $h = f_{\text{вч}}/f_0$ — число ВЧ-гармоник.

В накопительных кольцах с большим коэффициентом уплотнения орбит $\alpha_p \sim 1$ для получения коротких электронных сгустков требуется большая амплитуда ускоряющего напряжения [3].

В сверхминиатюрном накопительном кольце с ВЧ-системой, работающей на резонансной частоте $f_{вч} = f_0 = 2450$ МГц, для предельно допустимой плотности ВЧ-мощности $P_{вч,макс}/S_{рез} = 20$ Вт/см² (типичное значение для ВЧ-систем ускорителей), $a = 8$ см, $b = 5,5$ см, $d = 9,5$ см и добротности резонатора $Q = 4000$ предельно допустимая амплитуда ускоряющего напряжения, рассчитанная по выражению $U_{эф,макс} = \pi E_{макс} R_0 \left[1 - 3/8 \pi R_0/d^2 \right]$, составляет $U_{эф,макс} = 100$ кВ для $P_{вч,макс} = 6,9$ кВт. Размеры прямоугольного резонатора a , b и d выбраны из условий отсутствия генерации мод высших порядков TE_{02} и TE_{11} ($0,6\lambda_{вч} < a < 0,95\lambda_{вч}$, $b < 0,5\lambda_{вч}$, где $\lambda_{вч} = c/f_{вч}$) и обеспечения максимально большой горизонтальной физической апертуры ускорителя $A_{гор} = b/2 - R_0$. Добротность $Q = 4000$ получена с помощью выражения для напряженности электрического поля в прямоугольном резонаторе $E_{макс} = (8QP_{вч}/\omega_{вч}\epsilon_0 V)^{1/2}$. При $P_{вч,макс} = 6,9$ кВт, используемом значении добротности и заданных размерах резонатора напряженность электрического поля $E_{макс}$ не должна превышать 20 кВ/см во избежание расстройки резонатора вследствие тепловой деформации [3]. Добротность $Q < 5000$ типична для резонаторов установок нагрева плазмы с помощью электронно-циклотронного резонанса [4]. В качестве источника непрерывной ВЧ-мощности можно использовать клистрон КУ-399 (Россия) с $P_{вч,макс} = 25$ кВт [5].

Время жизни электронного сгустка. Важным параметром накопительных колец является время жизни пучка. В качестве количественной оценки используется время полураспада, равное времени, за которое ток пучка уменьшается в 2 раза. Наблюдаемое время жизни пучка τ состоит из двух независимых компонентов

$$1/\tau = 1/\tau_{e-e} + 1/\tau_{газ},$$

где τ_{e-e} — время жизни вследствие электрон-электронного рассеяния в сгустке; $\tau_{газ}$ — время жизни вследствие рассеяния электронного пучка на частицах остаточного газа.

Для оценки времени жизни пучка вследствие электрон-электронного рассеяния в сгустке (однократного эффекта Тушека) обычно используется формула [6]

$$\frac{1}{\tau_{Туш}} = \frac{N_{ср} r_0^2 c}{8\pi\sigma_{гор}\sigma_{верт}\sigma_L\gamma^2 \Delta E/E_{макс}^3} D(\xi), \quad (4)$$

где $\sigma_{гор,верт} = (\epsilon_{гор,верт} \beta_{гор,верт})^{1/2}$ — средний горизонтальный и вертикальный размер сгустка; σ_L — среднеквадратичная длина сгустка; $(\Delta E/E)_{макс}$ — энергетический аксептанс накопительного кольца; $D(\xi)$ — функция ξ , где $\xi = \{[(\Delta E/E)_{макс} \beta_{гор,ср}] (\gamma \sigma_{гор})^{-1}\}^2$.

Легко показать, что время жизни пучка вследствие однократного эффекта Тушека прямо пропорционально амплитуде ускоряющего напряжения $U_{макс}$.

Измерения показали, что в некоторых накопительных кольцах фактическое время жизни пучка, ограниченное электрон-электронным рассеянием в сгустке, сильно отличается от рассчитанного по формуле (4). Для достижения более точной оценки интенсивности эффекта электрон-электронного рассеяния в сгустке в работе [2] предложена эмпирическая формула

$$\frac{1}{\tau_{макс}} = \text{const} \frac{N_{ср}}{\sigma_{верт,эф} \sigma_L \gamma^{2,8} \Delta E/E_{макс}}, \quad (5)$$

где const — эмпирическая константа; $\sigma_{верт,эф} = (\epsilon_{верт} R)^{1/2}$ — эффективный вертикальный размер сгустка; $\epsilon_{верт}$ — вертикальный эмиттанс; $R \sim c/f_{вч} \approx L_{сеп}$ — переменный коэффициент с размерностью длины; $L_{сеп}$ — длина ВЧ-сепаратрисы, соответствующая длине области устойчивости фазового движения частиц сгустка.

Анализ экспериментальных данных показал, что в качестве вертикального эмиттанса пучка $\epsilon_{верт}$ лучше использовать минимальный эффективный вертикальный эмиттанс в поворотных магнитах $\epsilon_{верт,эф} = \sigma_{верт} \sigma'_{верт}$, где $\sigma_{верт}$ и $\sigma'_{верт}$ — вертикальный размер и расходимость электронного сгустка соответственно. В некоторых накопительных кольцах $\epsilon_{верт,эф}$ существенно отличается от вертикального эмиттанса $\epsilon_{верт} = (k/1 + k)\epsilon_0$. Например, в накопительном кольце PF-AR (Япония) $\epsilon_{верт,эф}/\epsilon_{верт} = 2,45$ при коэффициенте связи бетатронных колебаний $k = 1\%$. Используя данные работы [7] $E = 6,5$ ГэВ,

$(\Delta E/E)_{вч} = 0,82\%$, $\epsilon_{гор} = 260$ нм·рад, $k = \epsilon_{верт}/\epsilon_{гор} = 1\%$, $K_{сг} = 1$, $\sigma_L = 20$ мкм, $\beta_{гор.ср} = 9,1$ м, $\beta_{верт.ср} = 8,9$ м, можно рассчитать время жизни пучка в PF-AR вследствие эффекта Тушека и сравнить его с временем жизни, полученным по формуле (5). В расчете следует учитывать, что из-за большого горизонтального эмиттанса пучка и высокой рабочей энергии поперечный импульс электронов пучка в горизонтальной плоскости $\delta q_{гор} = \gamma(\epsilon_{гор}/\beta_{гор.ср})^{1/2}$, выраженный в единицах m_0c , больше единицы и поэтому нельзя использовать формулу (4), справедливую только для $\delta q_{гор} < 1$. Время жизни пучка в PF-AR вследствие эффекта Тушека, рассчитанное по формуле, справедливой для всех значений поперечного импульса (см. формулу (4) и рис. 2 [8]), для тока пучка 60 мА составляет $\tau_{Тущ} = 43$ ч, а не 75 ч, как было бы в случае использования формулы (4). Оценка времени жизни пучка по формуле (5), где вместо $\epsilon_{верт}$ используется $\epsilon_{верт.эф}$, составляет для указанных параметров PF-AR $\tau_{макс} = 30$ ч. Измеренное время жизни пучка в PF-AR при токе 60 мА равно 21 ч и считается в основном ограниченным давлением остаточного газа [7].

Поскольку длина сгустка $\sigma_L \sim (\alpha_p/U_{макс})^{1/2}$, а ВЧ-энергетическая апертура $(\Delta E/E)_{макс} \sim (U_{макс}/\alpha_p)^{1/2}$, время жизни пучка в формуле (5) не зависит от амплитуды ускоряющего напряжения $U_{макс}$ и коэффициента уплотнения орбит α_p — параметра магнитной структуры накопительного кольца.

Независимость времени жизни пучка, ограниченного электрон-электронным рассеянием в сгустке, от амплитуды ускоряющего напряжения при $U_{макс} > U_{макс.пор}$. Где $U_{макс.пор}$ — пороговая амплитуда ускоряющего напряжения, часто наблюдается в накопительных кольцах. Например, измерения в накопительном кольце «Сибирь-2» (Россия) показали, что для $E_{инж} = 450$ МэВ $U_{макс.пор} \sim 60$ кВ [9]. При $U_{макс} < U_{макс.пор}$ время жизни пучка прямо пропорционально амплитуде ускоряющего напряжения $U_{макс}$, что, как отмечалось, характерно для однократного эффекта Тушека.

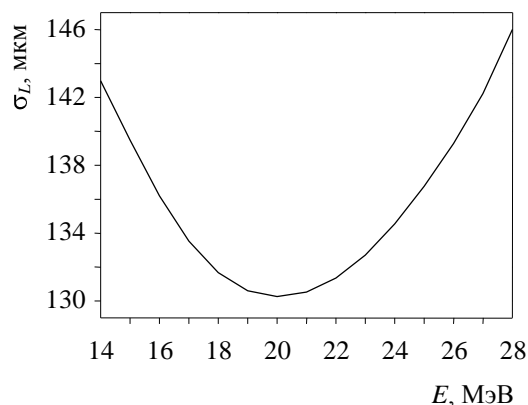
Таким образом, формула (5) пригодна для расчета лишь максимально возможного времени жизни пучка $\tau_{макс}$, ограниченного электрон-электронным рассеянием в сгустке, и может применяться только в случае близости амплитуды ускоряющего напряжения $U_{макс}$ к некоторому

пороговому значению $U_{макс.пор}$ или его превышения. Для нахождения примерного значения $U_{макс.пор}$ следует приравнять формулу (4) к формуле (5).

В таблице показано новое применение формулы (5) [2] к некоторым накопительным кольцам, работающим на пониженной энергии в сильноточном режиме. В этом режиме эффекты, связанные с электрон-электронным рассеянием в сгустке, проявляются особенно сильно. В таблице в качестве $(\Delta E/E)_{макс}$ используется расчетный продольный ВЧ-аксептанс при типичном рабочем напряжении на резонаторе (кроме CESR TA), $K_{сг}$ — количество сгустков в пучке, коэффициент связи бетатронных колебаний $k = \epsilon_{верт}/\epsilon_{гор}$ показан для справки.

Данные для таблицы и комментарии к ней взяты из трудов конференций, журнальных статей, диссертаций и презентаций. Близость рассчитанного по формуле (5) и измеренного времени жизни пучка, по-видимому, указывает на возможность достижения во многих накопительных кольцах порогового ускоряющего напряжения $U_{макс.пор}$ уже в обычных рабочих условиях.

Применение слаботочного режима. Применение сверхминиатюрного накопительного кольца в сильноточном режиме ($I_{п} = 20$ мА) обсуждалось в работах [1, 2]. В сильноточном режиме велика вероятность развития трудно контролируемых неустойчивостей, вызывающих дополнительное удлинение сгустка. В слаботочном режиме удлинение сгустка вызывает только многократное электрон-электронное рассеяние (многократный эффект Тушека). На рис. 1 показана длина сгустка при $I_{п} = 0,02$ мА ($N_{сг} = 51\ 000e$) при различной энергии электронов.



Р и с. 1. Зависимость средневекторной длины сгустка от энергии при $U_{эф.макс} = 100$ кВ, $k = 10\%$, $n = 0,01$

Сравнение рассчитанного по формуле (5) и наилучшего измеренного времени жизни пучка

Установка	E , ГэВ	$(\Delta E/E)_{\text{макс}}$, %	f_0 , МГц	$f_{\text{вч}}$, МГц	k , %	$\epsilon_{\text{верт}}$, нм·рад	σ_L , мм	$K_{\text{ср}}$	$I_{\text{п}}$, МА	$\tau_{\text{макс}}$, ч	$\tau_{\text{макс.изм}}$, ч
ASTRID (Дания)	0,58	0,494	7,5	105	29	50 ¹	300 ²	14	150	101	100
CESR TA (США)	2,09	0,8 ³	0,39	500	0,77	0,02	9,2 ⁴	1	1	0,92	0,7 ⁵
DELTA (Германия)	0,55 ⁶	1,96	2,6	500	2,5	0,4 ⁷	10	1	15	0,12	0,12
DORIS III (Германия)	2,29 ⁸	1,12	1,036	500	5 ⁹	6 ⁹	9,2 ⁹	10	120	6,37	5
KSR (Япония)	0,1 ¹⁰	0,94	11,67	117	18	13	7,1 ¹¹	10	10 ¹²	0,26	0,28
PF-AR (Япония)	2,5 ¹⁰	0,74	0,795	509	50	30 ¹³	32 ¹³	1	50	7,8	7,6
«Сибирь-2» (Россия)	0,45 ¹⁰	1,035	2,41	181	1	0,31 ¹⁴	52 ¹⁴	1	5	0,74	0,5 ¹⁵

¹Увеличенный вертикальный эмиттанс для искусственного повышения времени жизни пучка.

²Увеличенная из-за пучковых нестабильностей длина сгустка при $I_{\text{п}} = 150$ МА ($U_{\text{макс}} = 30$ кВ, $\sigma_{L0} = 65$ мм).

³Измеренный динамический аксептанс.

⁴Расчетная длина сгустка для $U_{\text{макс}} = 8,1$ МВ (номинальное значение).

⁵Расчетное время жизни пучка из-за эффекта Тушека с учетом многократного рассеяния.

⁶Рабочая энергия в режиме лазера на свободных электронах.

⁷Эффективный вертикальный эмиттанс для $k = 2,5\%$ ($\epsilon_{\text{гор.эф}} = 16$ нм).

⁸Режим с пониженной энергией электронов для работ по программе OLYMPUS.

⁹Расчетный размер сгустка и коэффициента связи k для $E = 2,3$ ГэВ.

¹⁰Энергия инжекции электронного пучка.

¹¹Расчетная длина сгустка для $f_{\text{с.изм}} = 60$ кГц ($U_{\text{макс}} = 15$ кВ), $(\Delta E/E)_{I=0 \text{ МА}} = 8,23 \cdot 10^{-5}$.

¹²При $I_{\text{п}} > 10$ МА время жизни пучка ограничено продольной нестабильностью ($I_{\text{пор}} \approx 1$ МА/сгусток).

¹³Размер сгустка для $I_{\text{п}} = 50$ МА и $U_{\text{макс}} = 2$ МВ, измеренный при $E = 2,55$ ГэВ.

¹⁴Расчетный размер сгустка с учетом многократного эффекта Тушека ($U_{\text{макс}} = 60$ кВ).

¹⁵Расчетное время жизни вследствие эффекта Тушека ($U_{\text{макс}} = 60$ кВ) с учетом многократного рассеяния.

Длина электронного сгустка рассчитана по методике [6]. Суммарный относительный энергетический разброс в формуле для длины сгустка

$$\sigma_E/E = \left[\sigma_E/E_0^2 + \sigma_E/E_{\text{Туш}}^2 \right]^{1/2},$$

где $(\sigma_E/E)_0 = [C_q \gamma^2 (1-n)/R_0(3-4n)]^{1/2}$ — естественный энергетический разброс сгустка; $(\sigma_E/E)_{\text{Туш}}$ — энергетический разброс из-за многократного эффекта Тушека; $C_q = 3,83 \cdot 10^{-13}$ м. Энергетический разброс из-за многократного эффекта Тушека находится с помощью решения самосогласованного уравнения

$$\left(\frac{\sigma_E}{E} \right)_{\text{Туш}}^6 = \frac{N_{\text{ср}} r_0^2 \beta_x \tau_E 2\pi f_s f \chi_m}{2^5 \pi \gamma^3 [\beta_x U_x + D_x^2] k \beta_z U_x^{1/2} \alpha_p},$$

где

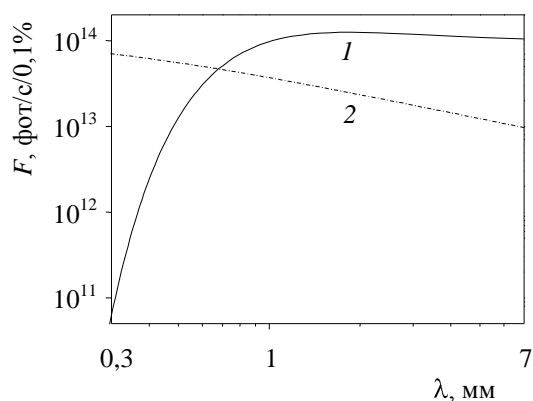
$$\chi_m = \frac{N_{\text{ср}}^{1/3} r_0^2 \beta_x^2 f_s/f_0^{1/3}}{2\pi^{1/2} \gamma^2 [\beta_x U_x + D_x^2]^{7/6} (k \beta_z U_x)^{1/6} R_0^{1/3} \alpha_p^{1/3}} \left(\frac{\sigma_E}{E} \right)_{\text{Туш}}^{-3};$$

$$U_x = \frac{U_{0x}}{1+k}; U_{0x} = \frac{J_E}{J_x} \left\{ \frac{1}{\beta_x} \left[D_x^2 + \left(\beta_x D_x' - \frac{1}{2} \beta_x' D_x \right)^2 \right] \right\};$$

$f(\chi_m)$ — функция, слабо зависящая от χ_m [6]; τ_E — время радиационного затухания синхротронных колебаний; D_x — радиальная дисперсия; R_0 — радиус кривизны орбиты в поворотных магнитах; $D_x = R_0(1-n)^{-1}$; $J_x = n(1-n)^{-1}$; $J_E = (3-4n)(1-n)^{-1}$; $D_x' = 0$; $\beta_x' = 0$; $\beta_x = R_0(1-n)^{-1/2}$; $\beta_z = R_0 n^{-1/2}$; $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-15}$ м.

Сгусток, имеющий Гауссово распределение плотности электронов, в свободном пространстве генерирует когерентное синхротронное излучение на длине волны $\lambda_{\text{СИ}} > \pi \sigma_L$.

Интенсивность когерентного синхротронного излучения пропорциональна квадрату числа частиц в сгустке $N_{\text{ср}}^2$, а не $N_{\text{ср}}^1$, как в случае обычного синхротронного излучения. На рис. 2 показана интенсивность когерентного синхро-



Р и с. 2. Поток излучения в канале вывода синхротронного излучения сверхминиатюрного накопительного кольца (1) и NSLS VUV (США) (2)

тронного излучения сверхминиатюрного накопительного кольца ($I_{\text{п}} = 0,02$ мА, $E = 26$ МэВ, $R_0 = 0,0195$ м, $\epsilon_{\text{верт}} = 16,7$ нм·рад, $\sigma_L = 0,14$ мм) и обычного синхротронного излучения в инфракрасных каналах вывода накопительного кольца NSLS VUV ($I_{\text{п}} = 1000$ мА, $E = 808$ МэВ, $R_0 = 1,91$ м, $\epsilon_{\text{верт}} = 4$ нм·рад, $\sigma_L > 50$ мм), рассчитанная с помощью компьютерной программы SPECTRA (версия 8.1) [10].

Для повышения интенсивности когерентного синхротронного излучения, выводимого из прямоугольного резонатора ВЧ-системы, используется собирающее металлическое зеркало размером 5×5 см, расположенное на внутренней поверхности широкой боковой стенки резонатора. Центр зеркала находится на расстоянии $b/2 \approx 2,75$ см от точки излучения с координатами $x = R_0 = 1,95$ см, $y = z = 0$ см. Отраженное ($K_{\text{отр}} \approx 1$) и сфокусированное собирающим металлическим зеркалом синхротронное излучение выводится к потребителям через прямоугольное отверстие размером 10×10 мм в противоположной широкой боковой стенке.

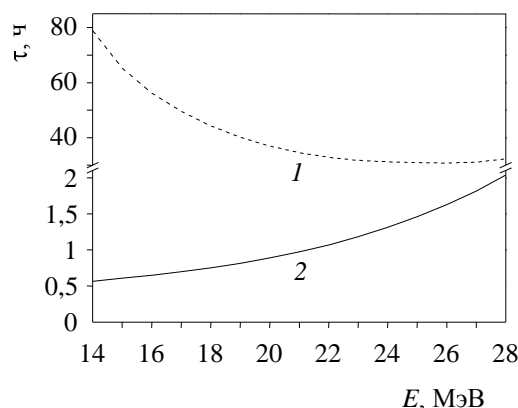
На рис. 2 видно, что для $\lambda_{\text{СИ}} \geq 0,7$ мм интенсивность когерентного синхротронного излучения сверхминиатюрного накопительного кольца, оснащенного собирающим зеркалом, при $I_{\text{п}} = 0,02$ мА превышает интенсивность обычного синхротронного излучения накопительного кольца NSLS VUV при $I_{\text{п}} = 1000$ мА.

Из-за низкой рабочей энергии ($E < 50$ МэВ) и малых равновесных размеров сгустка время жизни пучка в сверхминиатюрном накопительном кольце при суммарном рабочем вакууме

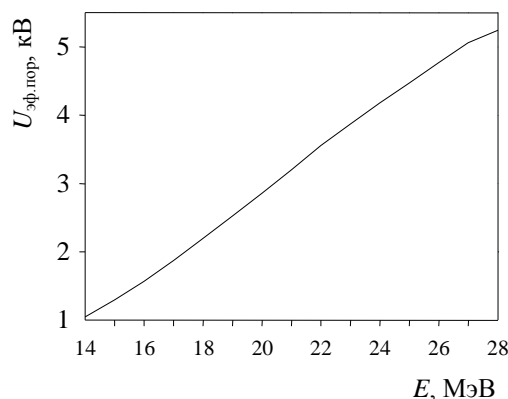
$P_{\text{раб}} = 1 \cdot 10^{-7}$ Па ($\text{H}_2 \sim 90\%$, $\text{CO} \sim 10\%$ — типичный состав остаточного газа в прогреваемых вакуумных камерах накопительных колец) ограничено электрон-электронным рассеянием в сгустке даже в слаботочном режиме.

Зависимость времени жизни пучка от энергии электронов, рассчитанная с учетом влияния на размеры сгустка эффекта многократного электрон-электронного рассеяния, показана на рис. 3. Как видно, время жизни пучка, рассчитанное по формуле (4), более чем в 10 раз отличается от рассчитанного по формуле (5). На рис. 4 показаны пороговые амплитуды ускоряющего напряжения $U_{\text{эф.макс.пор}}$, при которых оба способа расчета приводят к примерно одинаковому времени жизни пучка ($\tau_{\text{Тул}} \sim \tau_{\text{макс}}$).

В соответствии с формулой (5), начиная с $U_{\text{эф.макс.пор}}$ время жизни пучка в сверхминиатюрном накопительном кольце не зависит от амплитуды ускоряющего напряжения и дальнейший рост $U_{\text{эф.макс}}$ до 100 кВ сопровождается только сокращением длины сгустка.



Р и с. 3. Время жизни пучка в сверхминиатюрном накопительном кольце при $I_{\text{п}} = 0,02$ мА, $U_{\text{эф.макс}} = 100$ кВ, $k = 10\%$, $n = 0,01$, рассчитанное по формуле (4) (1) и (5) (2)



Р и с. 4. Зависимость амплитуды эффективного порогового напряжения от энергии электронов

Независимость времени жизни пучка вследствие электрон-электронного рассеяния в сгустке от амплитуды ускоряющего напряжения обычно связывается с дополнительным ограничением времени жизни, вызванным физической или динамической апертурой накопительного кольца, которая с ростом ускоряющего напряжения становится меньше продольной ВЧ-апертуры. Согласно формуле (5) независимость времени жизни пучка от ускоряющего напряжения является следствием изменения вида зависимости времени жизни от параметров накопительного кольца, а не ограничений, вызванных физической или динамической апертурой. В сверхминиатюрном накопительном кольце с указанными размерами резонатора ВЧ-системы физическая и динамическая апертура очень велики: $A_{\text{гор}} = b/2 - R_0 = 8$ мм, $A_{\text{верт}} = a/2 = 40$ мм, $(\Delta E/E)_{\text{дин}} \sim A_{\text{гор}}/2D_x = \pm 20\%$, и ограничивающей в указанном на рис. 3 диапазоне энергии является только продольная ВЧ-апертура. Отсутствие дополнительных ограничений времени жизни пучка, связанных с физической или динамической апертурой, позволяет провести экспериментальную проверку эффекта электрон-электронного рассеяния в сгустке в широком диапазоне ускоряющих напряжений и сравнить экспериментальные данные с рассчитанными по формулам (4), (5) (см. рис. 3). Большое время жизни пучка в слаботочном режиме позволяет ускорять электроны до энергии в десятки МэВ непосредственно в медленно растущем магнитном поле ($dB/dt = 0,005\text{—}0,01$ Тл/с) сверхпроводящего электромагнита, что сильно упрощает предложенную в работе [1] конструкцию магнитной системы ускорителя.

Заключение. В слаботочном режиме сверхминиатюрное накопительное кольцо можно применять в качестве интенсивного источника

миллиметрового синхротронного излучения и лабораторной установки для экспериментального исследования эффекта электрон-электронного рассеяния в сгустке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макулькин А.В.** Возможный источник когерентного синхротронного излучения в терагерцевом спектральном диапазоне на основе сверхминиатюрного синхротрона. — Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 5, с. 388—394.
2. **Макулькин А.В.** Исследование времени жизни сильно-точного пучка в сверхминиатюрном накопительном кольце. — Там же, 2009, т. 106, вып. 1, с. 52—56.
3. **Murphy J., Krinsky S.** Millimeter wave coherent synchrotron radiation in the SXLS phase I electron storage ring. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res., Sec. A, 1994, v. 346, p. 571—577.
4. **Garner H., Ohkawa T., Howald A. e.a.** An inexpensive x-ray source based on an electron cyclotron. — Rev. Sci. Instrum., 1990, v. 61, p. 724—727.
5. **Freidovich I.A., Knapp E.A., Alimov A.S. e.a.** Multi-beam klystrons with reverse permanent magnet focusing system as the universal RF power sources for the compact electron accelerators. — In: Proc. of RuPAC 2006. Novosibirsk, Russia, p. 100—102.
6. **Le Duff J.** Single and multiple Touschek effects. — In: CAS—CERN Accelerator School: 5-th Advanced Accelerator Physics Course. CERN 95-06, 1995, p. 573—586.
7. **Tanimoto Y., Honda T., Uchiyama T. e.a.** Improvement of beam lifetime and vacuum system of the PF-AR. — Vacuum, 2009, v. 84, p. 760—764.
8. **Walker R.** Calculation of the Touschek lifetime in electron storage rings. — In: Proc. of 1987 IEEE Part. Accel. Conf., p. 491—493.
9. **Valentinov A.G., Korchuganov V.N., Krylov Yu.V. e.a.** An increasing of electron beam lifetime at injection energy in Siberia-2 storage ring by regulating of betatron coupling. — In: Proc. of RuPAC 2010. Protvino, Russia, p. 218—220.
10. **Tanaka T., Kitamura H.** SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code. — J. Synch. Rad., 2001, v. 8, p. 1221—1228.

Поступила в Редакцию 23.11.10