

## Инжектор синхротрона СКИФ с термокатодной высокочастотной пушкой

© В.Н. Волков,<sup>1</sup> М.В. Арсентьева,<sup>1,2,3</sup> А.М. Барняков,<sup>1</sup> А.М. Батраков,<sup>1</sup> Е.А. Бехтенов,<sup>1</sup> Н.Г. Васильева,<sup>1</sup> С.М. Гуров,<sup>1</sup> С.Е. Карнаев,<sup>1</sup> А.А. Кондаков,<sup>1</sup> А.Н. Косарев,<sup>1</sup> С.А. Крутихин,<sup>1</sup> Г.Я. Куркин,<sup>1</sup> А.Е. Левичев,<sup>1,2,3</sup> А.Ю. Мартыновский,<sup>1</sup> О.И. Мешков,<sup>1,2</sup> С.В. Мотыгин,<sup>1</sup> Д.А. Никифоров,<sup>1,3</sup> В.К. Овчар,<sup>1</sup> А.В. Павленко,<sup>1</sup> О.А. Павлов,<sup>1</sup> М.В. Родякин,<sup>1</sup> Е.А. Ротов,<sup>1</sup> И.К. Седяров,<sup>1</sup> А.М. Семенов,<sup>1,2</sup> Ма Сячао,<sup>1,4</sup> М.Г. Федотов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский кольцевой источник фотонов СКИФ, 630559 Кольцово, Россия

<sup>4</sup> National Synchrotron Radiation Laboratory (NSRL), USTC, China  
e-mail: V.N.Volkov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 8 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2024 г.

Принято к публикации 18 апреля 2024 г.

Описаны состав, принципы работы и настройки группирующего канала преинжектора — начального участка инжектора синхротрона четвертого поколения СКИФ, разрабатываемого в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера. Основной задачей преинжектора является формирование коротких сгустков с малым энергетическим разбросом и ускорение их до релятивистской энергии. В преинжекторе впервые в мировой практике применена термокатодная высокочастотная пушка с сеточным управлением. Отмечены специфические особенности работы, связанные с применением высокочастотной (ВЧ) пушки. Проанализированы расчетные и измеренные характеристики пучка в ВЧ пушке и в преинжекторе. Разработана методика калибровки характеристик и настройки преинжектора.

**Ключевые слова:** группирующая высокочастотная система, динамика продольной группировки, длительность сгустков, энергетический разброс, настройка системы высокочастотной группировки.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58132.32-24

### Введение

В отличие от инжектора СКИФ [1] с высокочастотной (ВЧ) пушкой в большинстве синхротронов используются статические пушки с термокатодом, управляемым с помощью сетки. В этих пушках импульс напряжения длительностью 1–2 ns на катоде отпирает электронный поток с катода, который, проходя сквозь сетку, ускоряется в электростатическом поле пушки до относительно низкой энергии 50–100 keV. В дальнейшем полученные сгустки проходят сквозь ВЧ поля группирующих резонаторов и сокращаются по длине до десятков пикосекунд с тем, чтобы была возможность дальнейшего ускорения их до энергии 3–4 MeV в предускорителе 2856 MHz и далее в линейном ускорителе 2856 MHz до энергии 100–200 MeV. В инжекторах необходимо получить энергетический разброс пучка не хуже 1%. По такому принципу работают инжекторы синхротронов DLS [2], SLS [3], NSLS [4], ESRF [5], ALS [6] и многих других. Такой же принцип используется в описываемом инжекторе СКИФ [7], только вместо статической пушки впервые в мировой практике используется термокатодная сеточно-управляемая ВЧ пушка [8].

Недостатком электростатических пушек является низкая энергия пучка, наличие ионной бомбардировки катода со стороны положительно ионизированных в вакууме молекул газа и необходимость использования громоздкого высоковольтного оборудования, опасного и неудобного в эксплуатации. К таким пушкам выдвигаются повышенные требования к вакууму и, кроме того, требования к уменьшению продольных размеров всего инжектора для того, чтобы сократить время группирования, в течение которого эмиттанс пучка из-за относительно низкой энергии быстро портится под действием его пространственного заряда.

ВЧ пушки лишены этих недостатков. В ВЧ поле ионная бомбардировка практически отсутствует, так как массивные ионы не успевают разогнаться в ВЧ поле до энергий, способных повредить катод. Вследствие этого проблема срока службы катода снимается с повестки (без учета старения), и существенно снижаются требования к вакууму в инжекторе [9,10]. Термокатод с сеточным управлением, принципиально такой же, как в обычных статических пушках, помещается в ВЧ поле в задней стенке специального ВЧ резонатора. Далее после ВЧ пушки пучок группируется по такому же

принципу, как в инжекторах со статическими пушками, и затем ускоряется сначала в предускорителе, а затем в линаке 2856 МГц до 200 МэВ.

Величина ускоряющего напряжения ВЧ пушки не ограничивается проявлением эффекта обратной ионной бомбардировки, как в статических пушках, поэтому ВЧ напряжение и энергию пучка ВЧ пушки можно повышать вплоть до 1 МэВ. Вследствие этого дрейфовый участок группировки сгустков преинжектора удлиняется до 2–3 м, на нем свободно размещается необходимое диагностическое оборудование. Таким образом, применение ВЧ пушки в инжекторе синхротрона четвертого поколения СКИФ упрощает и удешевляет его конструкцию и эксплуатацию, а также повышает качество электронного пучка. Две аналогичные (но не импульсные) ВЧ пушки, созданные в ИЯФ [9,10], на практике подтверждают вышеуказанные свойства. Фотокатодные ВЧ пушки со сложной лазерной системой, тем более сверхпроводящие, не рассматриваются здесь из-за того, что для них пока еще не созданы как достаточно надежно работающие фотокатоды, так и недорогие технологии ВЧ сверхпроводимости. Далее приводятся для сравнения описания иных термокатодных ВЧ пушек, применяемых в мировой практике.

Широко распространены ВЧ пушки 2856 МГц с термокатодом без управляющей сетки, который помещается в задней стенке ВЧ резонатора [11]. Электроны эмитируются из катода во время действия положительного полупериода ВЧ, и полученные таким образом относительно длинные сгустки ускоряются в ВЧ поле. Затем сгустки группируются в специальном поворотном  $\alpha$ -магните. По стоимости и сложности инжекторы такой конструкции практически не отличаются от описанных выше инжекторов со статическими пушками [12]. Их недостатком является наличие обратно ускоренных электронов, бомбардирующих катод и сокращающих срок его службы, а также сложности с получением одиночных электронных сгустков.

Данных недостатков лишены термокатодные ВЧ пушки со встроенной сеткой (без внешнего управления), применяемые в мощных промышленных ускорителях ИЛУ [13]. Электроны с катода вытягиваются ВЧ полем пушки, проникающим сквозь сетку в течение положительного полупериода ВЧ поля. Благодаря наведенному пучком напряжению на сетке эмиссия электронного сгустка из катода прерывается при фазе ВЧ поля, после которой эмитированные электроны тормозятся в изменившем свой знак переменном ВЧ поле и ускоряются в обратном направлении, бомбардируя катод (как это происходит в ВЧ пушках без сетки). Сетка здесь управляется импульсами напряжения, наводимыми самим сгустком на емкости катод–сетка, сдвинутыми по фазе специальным короткозамыкающим коаксиальным шлейфом определенной длины. Дополнительно к этому через шлейф подается постоянное запирающее смещение на катод, которое также регулирует длительность эмиссии. Средний ток пучка в этих ускорителях —

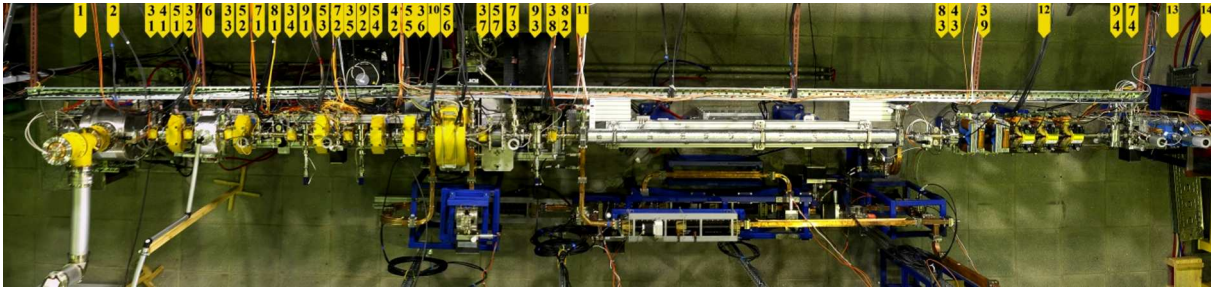
0.5–1.5 А, и время жизни катодов — до 2000 ч, что ярко демонстрирует преимущество ВЧ пушек перед статическими пушками. Такие ВЧ пушки генерируют только серию сгустков.

## 1. Структура и параметры преинжектора СКИФ

В состав преинжектора (рис. 1) входят: модулятор катодно-сеточного узла 1, ВЧ пушка 178.5 МГц 2, резонатор-группирователь 535.5 МГц 5, предускоритель на бегущей волне 2856 МГц 10 и первая из пяти многоячеечных ускоряющих секций на бегущей волне с модой колебаний  $2\pi/3$  11. Для ВЧ питания в инжекторе используются два импульсных твердотельных усилителя на 178.5 МГц (700 кВт) и 535.5 МГц (10 кВт), а также один из трех клистронов 2856 МГц (40 МВт) с ответвлением ВЧ мощности 10 МВт для предускорителя. Используется штатная система управления и синхронизации от фирмы Libera. ВЧ пушка генерирует электронные сгустки с энергией до 700 кеВ и частотой повторения 1 Нз в двух режимах: одиночные сгустки 1 пС, либо серию из 55 сгустков по 0.3 пС, или любую другую комбинацию сгустков с общим зарядом не более 16 пС. (Время настройки/переключения работы инжектора с одного режима на другой занимает примерно полчаса при отработанной методике.) Сгустки группируются в преинжекторе с 1 ns до 6–10 ps (FWHM) при их ускорении до энергии 2–3 МэВ в предускорителе и далее ускоряются до 30–45 МэВ в ускоряющей секции. Инжектор должен обеспечивать энергетический разброс сгустков не больше 1% (rms (root mean square)), временную нестабильность меньше  $\pm 2$  ps, нормализованный эмиттанс не хуже  $60\lambda$  mm-mrad и энергию 200 МэВ.

## 2. Динамика электронного пучка в преинжекторе

Источником электронов в ВЧ пушке является термокатод, управляемый в зазоре катод–сетка импульсным напряжением амплитудой до 100 В с длительностью 1 ns. Задачей преинжектора является продольная группировка наносекундных электронных сгустков из ВЧ пушки до длительности меньше 10 ps с энергетическим разбросом до 1% (rms). Эта задача решается созданием соответствующего распределения плотности заряда и энергии частиц вдоль сгустков. Принцип продольной группировки сгустков в ВЧ пушке и в преинжекторе заключается в создании увеличенной скорости частиц в хвостовой части сгустка, из-за которой электроны в этой части сгустка догоняют частицы на переднем фронте сгустка на определенном участке дрейфа. Затем после ускорения сгруппированного сгустка до релятивистских энергий группировка приостанавливается. Сгустки из ВЧ пушки уже имеют неоднородное продольное распределение энергии, повторяющее синусную зависимость



**Рис. 1.** Преинжектор ускорителя СКИФ: 1 — модулятор (внутри ВЧ пушки); 2 — ВЧ пушка, 3/1–3/9 — корректоры; 4/1–4/3 — датчики FCT (Fast Current Transformer); 5/1–5/7 — соленоиды; 6 — группирующий резонатор 535.5 MHz; 7/1–7/4 — люминофоры; 8/1–8/3 — пикапы; 9/1–9/4 — стрик-камеры; 10 — предускоритель (внутри соленоида 5/6); 11 — ускоряющая секция 2856 MHz; 12 — триплет; 13 — сканер; 14 — цилиндр Фарадея.

напряжения на ВЧ пушке и способствующее эффекту группировки. Решение простой задачи о расстоянии, на котором вторая частица догонит первую, если ее энергия больше, чем у первой при данной зависимости, выражается в следующем виде:

$$S = \frac{c}{\omega} \sqrt{(E/mc^2 + 2)^3 \cdot E/mc^2 \cdot \text{tg}(\varphi)}, \quad (1)$$

где  $E$  — максимальная энергия частиц (или амплитуда напряжения ВЧ в [eV]),  $\omega$  — круговая частота ВЧ в пушке,  $\varphi$  — фаза ВЧ, при которой испускаются частицы,  $c$  — скорость света,  $m$  — масса электрона.

График зависимости (1) приведен на рис. 2, *a*. Из графика видно, что для напряжений ВЧ 700–800 kV длина дрейфового промежутка составляет порядка 2 м. Этот промежуток определяет размеры группирующего участка. Для сравнения, у большинства статических пушек с энергией пучка 50–100 keV и соответствующим напряжением группирующего резонатора  $\sim 50$  kV этот промежуток составляет всего 20 см.

Аналогичный анализ показывает, что эффект группировки происходит также в зазоре катод–сетка, где отпирающее напряжение также изменяется по синусоидальному закону с эквивалентной частотой 400 MHz и с амплитудой около 50 V (рис. 2, *b*). Согласно формуле (1), данная прикатодная группировка происходит на расстоянии 2–6 мм от катода. Расчеты предсказывают формирование крутого фронта в продольном распределении заряда сгустков. Расчеты предсказывают также (с учетом эффекта скачкообразного роста тока на пустом от электронов участке перед катодом, где в начальный момент отпирающий закон 3/2 Ленгмора не работает), что пиковый ток катода на переднем фронте сгустков может в десятки раз превысить ток эмиссии.

В дальнейшем при анализе процессов группировки учитывается, что принцип сохранения поперечного эмиттанса, согласно теореме Лиувилля, здесь, на участке группировки, применяться не может из-за относительно большой длины и энергетического разброса нерелятивистских сгустков [12], так как разные части длинного

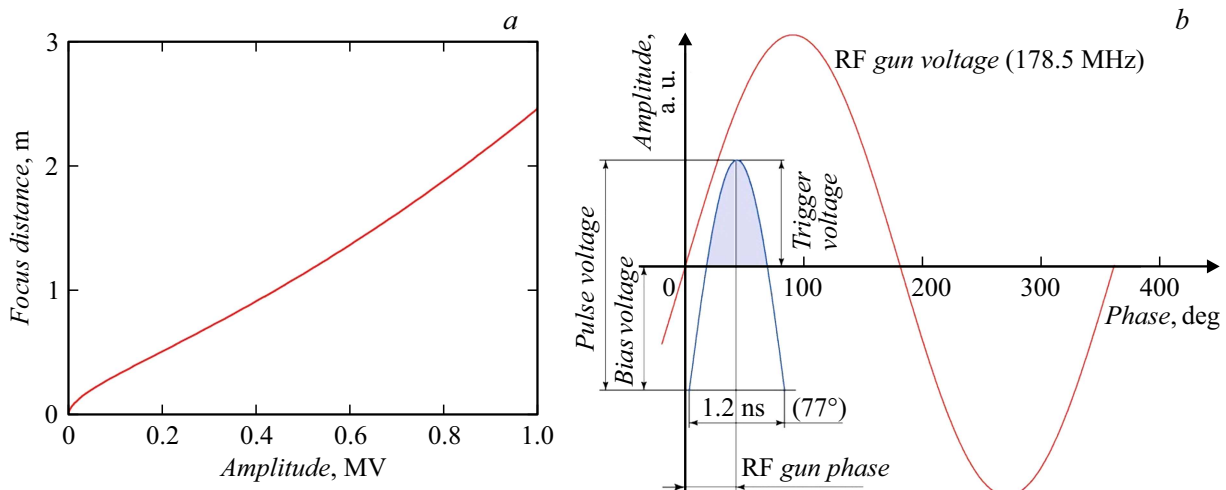
сгустка ускоряются и фокусируются переменным ВЧ полем по-разному. Также упомянутый выше известный закон 3/2 не применим в случае расчета тока эмиссии с катода, так как он выведен для стационарных условий бесконечно длинного пучка. Здесь, в быстропеременных ВЧ полях, используется численное моделирование электронного потока, учитывающее инерционную динамику электронного движения.

При создании численной модели преинжектора широко применялся пакет ASTRA [14], в котором взаимодействие электронного пучка с ВЧ полями и между собой моделируется с помощью эквивалентных им макрочастиц. При этом электронные сгустки представляются в виде массива из нескольких десятков тысяч макрочастиц. Численные модели динамики пучка в катодно-сеточном узле [15], а также распределение электромагнитных полей в резонаторах ВЧ пушки, группирующем и ускоряющих резонаторах, были созданы с помощью пакетов программ SLANS, CLANS, SAM [16] и CST [17].

Расчеты электронного пучка проводились последовательно на всех частях преинжектора, начиная с катодно-сеточного узла с продольными размерами порядка 80  $\mu\text{m}$ . За ним следует ускоряющий зазор ВЧ пушки с размером 80 мм и тракт группировки и ускорения с общей длиной 8 м (рис. 1).

За начало координат во всех расчетах принят центр катода, положение которого контролируется системой геознаков на корпусе ВЧ пушки. Для дальнейшего анализа необходимо определить понятие фазы ВЧ поля не только в ВЧ пушке, но и во всех резонаторах инжектора и всего синхротрона. Фазой ВЧ принято называть фазу ВЧ напряжения в любом резонаторе, действующую в момент вылета из катода центральной части сгустка (рис. 2, *b*). Подчеркнем, что это не те фазы ВЧ, которые действуют в резонаторах в момент пролета сгустков через них.

В численной модели катодно-сеточного узла осуществляется непрерывная эмиссия заряженных макрочастиц с током эмиссии 2.0 А и энергией 0.1–0.5 eV. Они создают электрическое поле пространственного заряда, направленное против движения. Из-за этого часть



**Рис. 2.** Эффект группирования сгустков: *a* — зависимость фокусного расстояния продольной группировки от амплитуды напряжения резонатора (см. (1) при  $\varphi = 45^\circ$ ), *b* — формы напряжений в ВЧ пушке: *Pulse Voltage* — амплитуда отпирающего импульса, *Bias Voltage* — запирающее смещение, *Trigger Voltage* — отпирающее напряжение.

эмитированных частиц возвращается на катод, а часть из них в зависимости от приложенного напряжения долетает до сетки и либо оседают на ней, либо пролетают через ячейки сквозь сетку наружу, в резонатор ВЧ пушки — так же как происходит в реальном случае с электронами. Отпирающий импульс от модулятора, поступающий на зазор катод–сетка, моделируется в форме половины косинусоиды с шириной по основанию 1.2 ns (400 MHz) и амплитудой 100 V (рис. 2, *b*). Также к зазору прикладывается постоянное запирающее напряжение 0–100 V. Разность между тем и другим — отпирающая. Электрические поля от этих напряжений и ВЧ поля, проникающие сквозь сетку из резонатора, а также поля пространственного заряда складываются в зазоре согласно принципу суперпозиции.

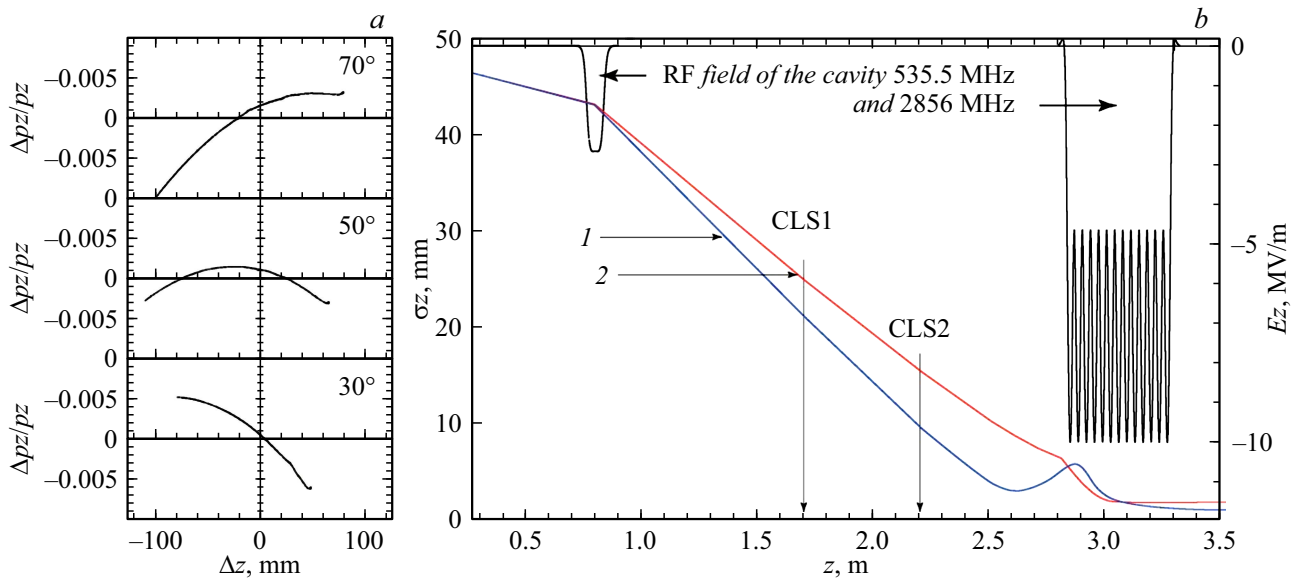
При воздействии данной комбинации электрических полей на каждую заряженную частицу, эмитированную с катода, формируется пучок в виде сгустка с длительностью менее 1 ns, который, попадая в ускоряющую фазу ВЧ напряжения в резонаторе, ускоряется его ВЧ полем. Так как каждая из частиц в сгустке попадает в свою определенную фазу ВЧ в резонаторе, на выходе из резонатора частицы получают каждая свою определенную энергию, поэтому сгусток из ВЧ пушки имеет характерное нелинейное продольное распределение энергий частиц, близкое к гармонической зависимости. Это распределение зависит от фазы ВЧ, которая была в момент прихода середины отпирающего импульса. На рис. 3, *a* представлены эти расчетные распределения для трех различных фаз ВЧ в пушке —  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  и  $70^\circ$ .

Величину заряда сгустка и его длину формирует верхушка отпирающего импульса, определяемая разностью его амплитуды и величиной запирающего смещения (рис. 2, *b*). Наименее короткие сгустки получаются при максимальной амплитуде отпирающего импульса, т.е. при наиболее короткой его верхушке. Из-за этого ампли-

туда данного импульса зафиксирована на 100 V, а заряд регулируется запирающим смещением. Так, заряд 0.3 nC получается при запирающем смещении 100 V в основном за счет проникающего сквозь сетку электрического ВЧ поля из резонатора. При этом расчетная длина сгустка составляет 45 mm (FWHM). Для получения в сгустке заряда 1.2 nC необходимо запирающее смещение 30 V, при этом расчетная длина сгустка составляет 138 mm, т.е. в три раза больше.

Минимальное запирающее смещение должно быть не ниже 20 V, иначе в режиме холостого хода, когда отпирающие импульсы отсутствуют, из катода проникающим сквозь сетку ВЧ полем вытягивается темновой ток в виде сгустков с зарядом до 0.3 nC и частотой 178.5 MHz. Тем не менее даже при запертом катоде наблюдается темновой ток из ВЧ пушки в несколько десятых долей микроампера, обусловленный автоэмиссией с сетки и мультипакторным разрядом на ней. На фоне пикового тока в несколько ампер в сгустках такой темновой ток практически не влияет на качество пучка.

Для инжектора важны начальные фазы до  $55^\circ$ , так как распределения энергии частиц при этих фазах способствуют группировке сгустков, когда задние частицы движутся быстрее передних. Оптимальной фазой в инжекторе СКИФ определена фаза  $\varphi = 40^\circ$ . При фазах меньше  $30^\circ$  часть головных частиц сгустков отрезается, попадая в отрицательные фазы ВЧ поля. В фазе  $55^\circ$  частицы в начале и конце продольного распределения заряда сгустков имеют одинаковую энергию, а весь сгусток в среднем имеет минимальный разброс по энергиям. В этой фазе сгустки имеют максимальную среднюю энергию  $\sim 98\%$  от амплитудного напряжения резонатора. При фазах, больших  $55^\circ$ , у частиц на переднем фронте сгустка энергии и скорости больше, чем на заднем фронте, и сгусток из-за этого удлиняется на участке дрейфа, а энергия сгустков уменьшается.



**Рис. 3.** *a* — распределение энергии частиц вдоль сгустков в зависимости от фазы ВЧ пушки; *b* — изменение rms длины 1 нС сгустков после группирующего резонатора в зависимости от их координаты для пары оптимальных фаз (535.5 MHz) и фазы  $40^\circ$  в ВЧ пушке (расчет).

Другой характерной фазой являются  $\varphi = 90^\circ$ , при которой в сгустке содержится максимальный заряд из-за того, что при этой фазе действует максимальное ВЧ поле в резонаторе, которое, проникая к катоду сквозь сетку, вытягивает дополнительные частицы. Данный эффект использовался при калибровке фазы ВЧ по измеренной зависимости заряда сгустков от фазы. При фазах выше  $120^\circ$  частицы в хвостовой части сгустков не успевают долететь до конца, так как слабо ускоряются спадающим после фазы  $90^\circ$  ВЧ полем. После изменения знака поля ( $\varphi > 180^\circ$ ), эти частицы начинают ускоряться в обратном направлении и достигают катода с достаточно высокой энергией, порядка  $1/2$  от амплитуды ВЧ в пушке.

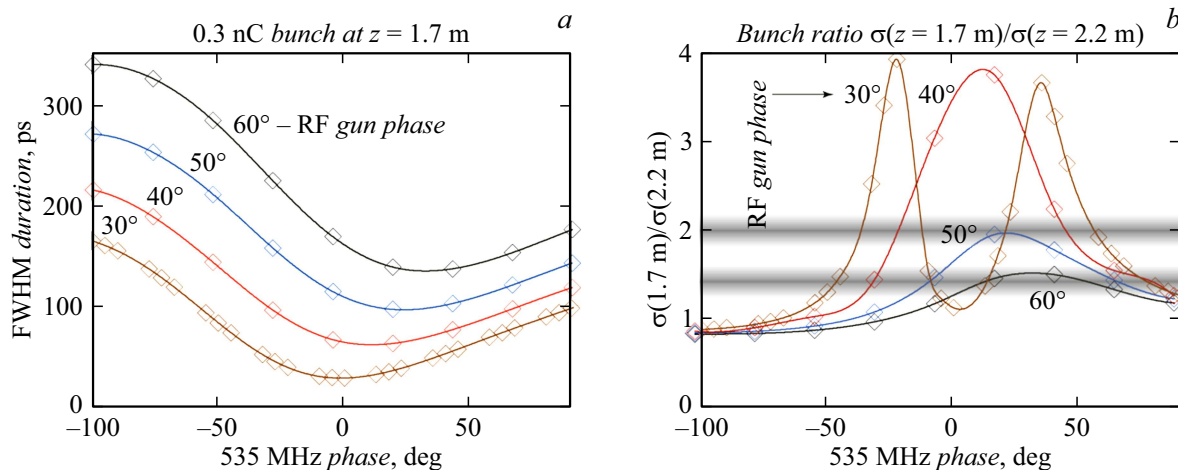
Существуют некоторые эффекты, связанные с влиянием сетки на формирование сгустков, не учитываемые в численной модели катодно-сеточного узла. Сетка должна частично экранировать катод от электрического поля пространственного заряда сгустка, имеющего длину порядка 50–150 мм. Расчеты, проведенные при вставленном поглотителе пучка за сеткой, показывают, что эта экранировка приводит к росту заряда в сгустках на 14% и к сокращению времени пролета частиц в зазоре катод–сетка на несколько градусов фазы ВЧ в резонаторе для сгустков с зарядом порядка 1 нС. Также здесь не учитывается аксиальная несимметричность гало пучка, так как сетка узла паркетного типа представлена моделью в виде эквивалентной ей аксиально симметричной сетки, состоящей из 27 концентрических колец [14]. Гало возникает из-за краевого эффекта при поперечной фокусировке пучка как на краях прямоугольных ячеек в сетке, так и на краях колец эквивалентной сетки. Интенсивность гало должна зависеть от общей длины

краев всех отверстий в сетке. В численной модели с кольцевой сеткой эта длина краев оказалась в два раза больше, чем в реальной сетке паркетного типа. Кроме того, не учитывается запирающее напряжение, наводимое самим пучком на емкости зазора катод–сетка (12 pF), шунтированное сопротивлением 50  $\Omega$ . Предполагается, что модулятор компенсирует это напряжение полностью.

Решающую роль в группировке сгустков имеет группирующий резонатор на третью гармонику (535.5 MHz), расположенный в инжекторе сразу после ВЧ пушки (6 на рис. 1). Фаза ВЧ в этом резонаторе выбирается близкой к той фазе, при которой пролетающие сквозь него сгустки теряют максимальную энергию ( $\sim 150$  keV). При точной настройке электромагнитное ВЧ поле резонатора с оптимальной фазой и амплитудой должно линейаризовать энергетическое распределение в сгустке так, чтобы в конце дрейфового участка, прямо перед предускорителем или внутри него, все частицы группировались в сгусток минимального размера 2–3 мм (rms).

Расчеты показывают, что существуют пары оптимальных фаз резонатора 535.5 MHz, отличающихся друг от друга в паре на  $10$ – $15^\circ$ . Одна из них предполагает максимальную группировку сгустков в координате  $\sim 200$  мм перед предускорителем, а другая — внутри него. На рис. 3, *b* показано расчетное изменение длин сгустков на группирующем участке инжектора для одной из таких фазовых пар. Для настройки фазы группирующего резонатора 535.5 MHz используются два черенковских датчика (CLS1, CLS2), расположенные в координатах 1.7 и 2.2 м. Первая фаза из упомянутой выше пары должна обеспечить соотношение измерение-





**Рис. 4.** Расчетные зависимости от фаз ВЧ резонаторов и фазы 535 МГц: *a* — длины сгустков в координате 1.7 м, *b* — соотношение длин этих сгустков в координатах 1.7 и 2.2 м.

мых стрик камерами длин сгустков  $2 \pm 0.5$ , а вторая —  $1.5 \pm 0.5$ .

Расчетные зависимости изменения длины в координате 1.7 м для 0.3 нС сгустков приведены на рис. 4, *a*. На рис. 4, *b* приводятся расчетные соотношения длин сгустков в координатах 1.7 и 2.2 м, где горизонтальными размытыми линиями обозначены уровни 1.5 и 2. Пересечение этих уровней с кривыми определяют оптимальные фазы группирующего резонатора 535.5 МГц. Из рис. 4 видно насколько сильно изменяются параметры настройки в зависимости от фазы ВЧ пушки, что свидетельствует о высоком требовании к стабильности и к точности установки ее фазы.

Как показывают расчеты и эксперименты, настроить группирующие режимы можно для широкого диапазона амплитуд ВЧ напряжений в ВЧ резонаторах. В частности, исследованы режимы 750 и 870 кэВ в ВЧ пушке, 100–200 кэВ в группирующем резонаторе, а также 1/3 ВЧ мощности от номинальной в предускорителе и 1/2 ВЧ мощности в ускоряющей секции [18]. Как правило, всегда можно найти оптимальные значения фаз в этих ВЧ устройствах, обеспечивающих номинальную группировку сгустков (10 ps). Здесь и далее под набором точно настроенных фаз имеются в виду такие фазы, отклонение которых в ту или иную сторону приводит к увеличению энергетического разброса пропорционально квадрату отклонения фазы.

В связи с этим настройка преинжектора сводится, первоначально, к установлению фазы в ВЧ пушке  $40^\circ$ , затем к установлению одной из двух вышеупомянутых в паре фаз резонатора 535.5 МГц, измеренных стрик-камерами. Затем настраивается фаза предускорителя по минимальной длине сгустков на его выходе, измеряемой там стрик-камерой. После этого подбирается фаза ускоряющей секции по максимуму энергии сгустков на ее выходе или по минимуму энергетического разброса, измеряемых в поворотном магните сканера. Настроенные

таким образом фазы затем уточняются подстройкой в небольших пределах  $\pm(1-10^\circ)$ , руководствуясь показаниями стрик-камеры на выходе ускоряющей секции или сканера в поворотном магните. Финальные фазы предускорителя и ускоряющей секции могут подстраиваться одновременно путем изменения фазы клистрона.

Как замечено выше, настраиваемые фазы должны быть достаточно точными и стабильными. Так, пределы фаз для всех четырех ВЧ устройств преинжектора, в которых обеспечивается номинальный энергетический разброс 1%, показаны для 0.3 нС сгустков на рис. 5 (внутри темных полос). Расчеты проводились с учетом возможных потерь частиц пучка на стенках канала пучка с апертурой 35 мм и на апертурах в предускорителе и ускоряющей секции диаметром 25.9 мм. На графиках видно, что за пределами этих полос все характеристики сгустков (энергетический разброс, длительность, эмиттанс) начинают расти экспоненциально. Тем не менее во всех диапазонах фаз на горизонтальных шкалах графиков пучок проходит без потери частиц. Это свидетельствует о том, что 100% прохождение пучка не гарантирует точную настройку преинжектора, так как энергетический rms разброс при этом может достигать до 20%, rms длительность сгустков до 8 нс, эмиттанс до  $110\pi$  мм·мрад и спад энергии до 20%.

Особо следует подчеркнуть важность точности установки фазы ВЧ пушки, имеющей самую узкую полосу допустимых фаз  $5-6^\circ$ . Тем более для 1 нС сгустков эта полоса в два раза уже. Кроме того, режим с серией из 55 сгустков (0.3 нСл) еще требует дополнительных исследований на стабильность, так как ее обеспечение связано с особенностями работы модулятора во многосгустковом режиме.

Замечено, что фаза ВЧ в пушке со временем меняется. Так, за летний период отпусков эта фаза изменилась на  $\sim 50^\circ$ . После каждой коммутации кабелей на блоках модулятора фаза уходит на  $\pm(1-20^\circ)$ . В связи с

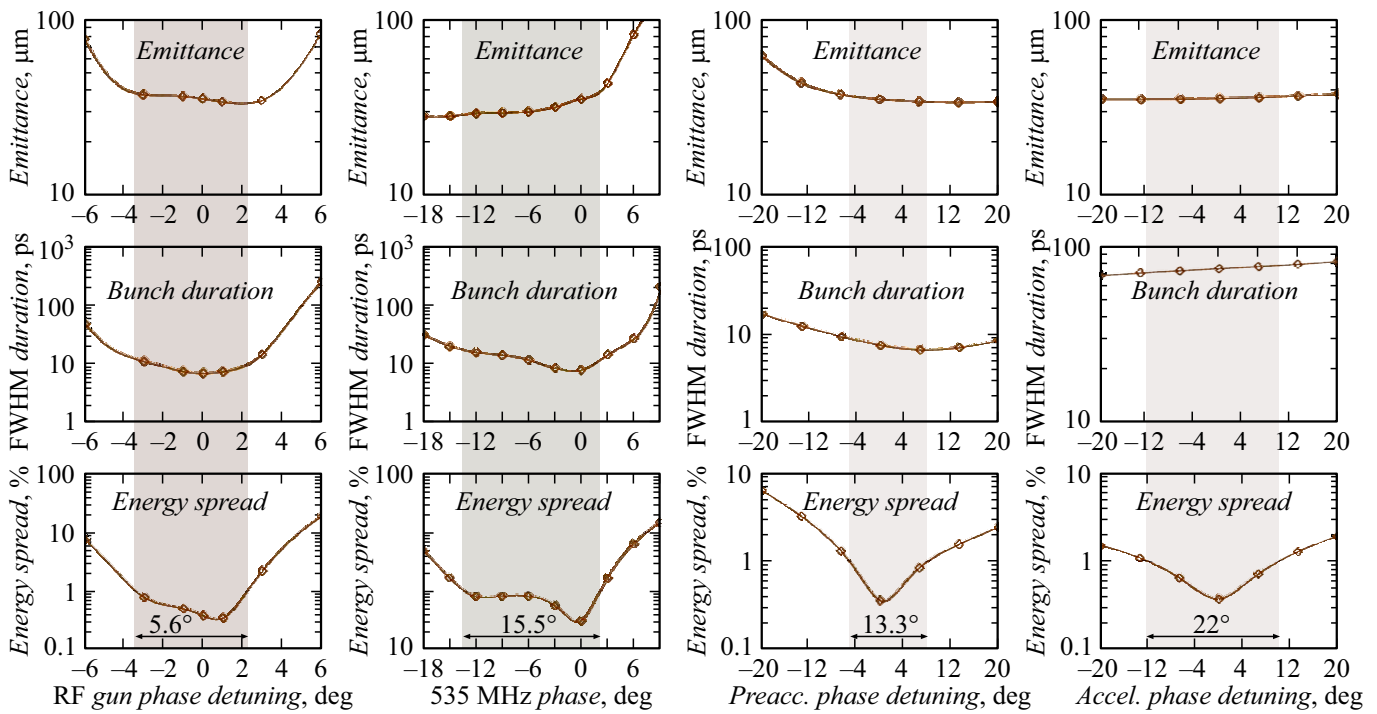


Рис. 5. Зависимость параметров 0.3 нС сгустков на выходе преинжектора от сдвига ВЧ фаз в ВЧ устройствах преинжектора.

этим было решено проверять настройку фазы ВЧ пушки каждый раз перед началом работы с ускорителем. Для этой цели разрабатывается автоматизированная система калибровки.

Для достижения прецизионных характеристик пучка необходимо обеспечивать высокую стабильность характеристик ВЧ питания ускоряющих резонаторов инжектора. Для этого на комплексе СКИФ существует система раздачи частот, которая формирует и раздает по комплексу набор синусоидальных сигналов с частотами 178.5, 357, 535.5, 2856 МГц со стабильностью фазы, включая фазовый шум на уровне 2–4 пс. Измерения показали величину фазового джиттера в резонаторах ВЧ пушки и группирующем резонаторе, а также джиттер пучка с двух ФСТ датчиков, около 5 пс от пика до пика (фазовый джиттер  $\Delta\varphi$  связан с временным джиттером  $\Delta\tau$  как  $\Delta\varphi = \omega\Delta\tau$ , где  $\omega$  — круговая частота ВЧ резонатора). Но в эту величину входит также вносимый джиттер измерительного прибора, который пока не известен. Для измерений использовался измеритель формы и фазы импульсов ADC4x250-FPM, который в качестве тактового получает сигнал опорной частоты 178.5 МГц.

Стабильность фаз и амплитуд в основном определяется стабильностью генераторов и качеством фазовых и амплитудных систем обратных связей, регулирующих резонансные частоты ВЧ резонаторов и их ВЧ амплитуды, а также качеством ВЧ резонаторов, исключая появление мультипакторных разрядов и высоковольтных пробоев. Высокое качество резонаторов обеспечивалось

применением соответствующих технологий при их изготовлении и применении ВЧ тренировок, описанных в отдельной статье [19].

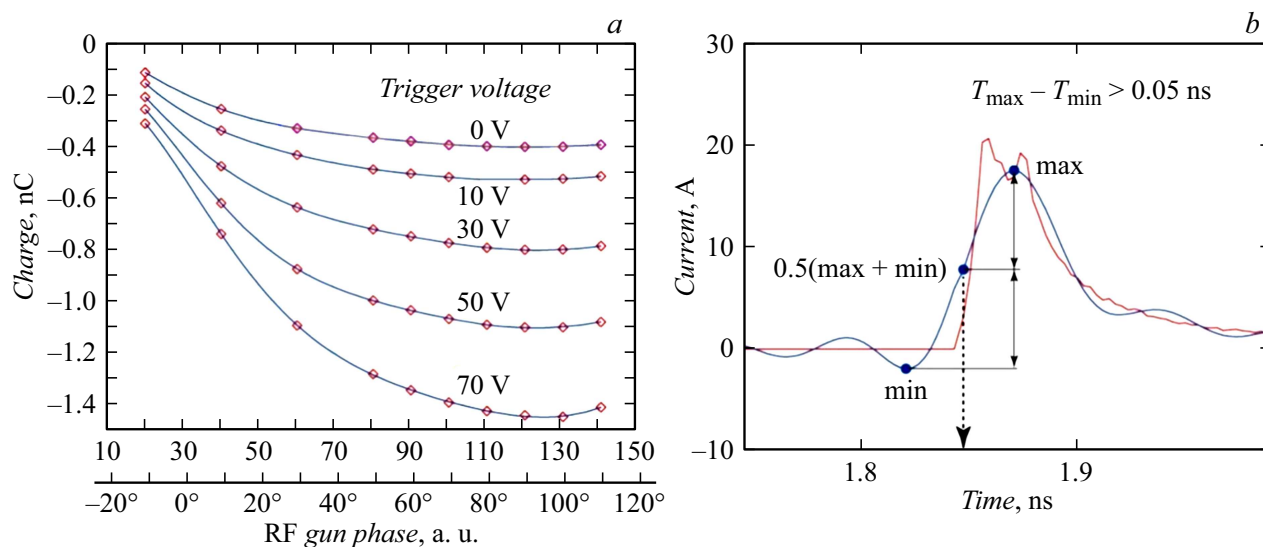
В разд. 3 рассматриваются методы калибровки ВЧ фаз и напряжений.

### 3. Калибровка фаз и напряжений ВЧ устройств преинжектора

Для повышения точности при калибровках везде далее использовался принцип усреднения как можно большего количества измерений.

#### 3.1. Калибровка фазы ВЧ пушки

Фазой ВЧ в пушке, как определено выше, является фаза ВЧ напряжения в пушке в момент эмиссии из катода центра сгустка. Эта фаза на пульте управления задается условным числом, величина которого пропорциональна фазе в градусах, но смещена на неопределенную величину. При калибровке определяется данное условное число, соответствующее фазе  $90^\circ$ , при которой заряд сгустков максимален из-за максимального ВЧ поля, проникающего из резонатора сквозь сетку и вытягивающего заряд из катода. Для этого датчиком ФСТ (Fast Current Transformer) измеряются несколько зависимостей величин заряда от фазы, отличающихся разными значениями отпирающих напряжений катода. На рис. 6, а приведен пример этих измеренных зависимостей для отпирающих напряжений катода 0,



**Рис. 6.** Калибровка фазы ВЧ пушки измерением (а) зависимостей величины заряда от этой фазы и отпирающего напряжения катода путем (б) интегрирования сигналов от FCT. Пример расчетного распределения тока в сгустке (красное) и его изображение (синее), полученное при ограничении спектра частотой в несколько GHz.

**Таблица 1.** Измеренные значения фазы, устанавливаемой с пульта в максимуме заряда

Отпирающее напряжение катода, V	0	10	30	50	70
Показание на пульте при максимуме заряда	119.3	120.2	123.4	122.6	124.6
Rms разброс измерений заряда, pC	1.02	0.46	0.79	1.19	2.18

10, 30, 50 и 70 V и новая шкала фаз в градусах, полученная в результате калибровки. Эти зависимости интерполируются полиномом шестой степени для того, чтобы все измеренные точки участвовали в калибровке. Затем в каждой зависимости определяются фазы с максимальным зарядом сгустков и вычисляется среднее арифметическое из этих фаз. В табл. 1 приводятся результаты калибровки, из которых вычисленная величина среднего значения, соответствующая фазе  $90^\circ$ , равна  $122.02 \pm 1.98$ .

Заряды в сгустках вычислялись интегрированием кривых распределения тока в сгустках, полученных в осциллографе фирмы ROLDE-SCHWARZ с датчика FCT. На рис. 6, б приведен типичный (рис. 7, с) вид такого распределения, показанный плавной (синей) кривой. При интегрировании учитывались отрицательные значения в форме измеряемого импульса, причем интегрировалась усредненная кривая по 10 импульсам. Приведенные в табл. 1 среднеквадратичные отклонения измеренных значений заряда от интерполяционной кривой свидетельствуют о хорошей точности данных измерений.

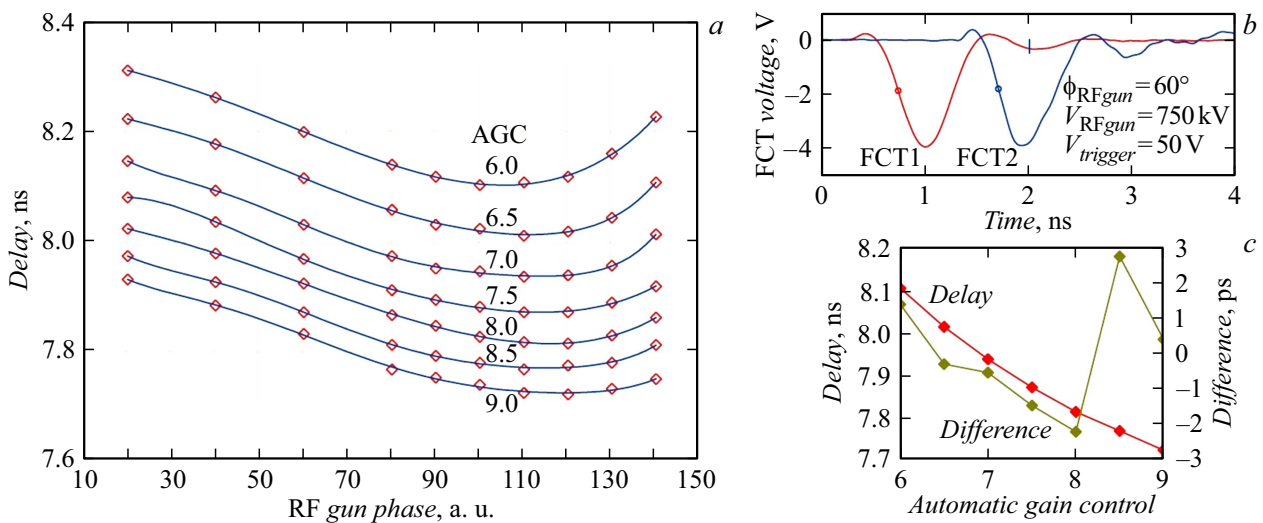
Тем не менее результирующие фазы в максимуме заряда для каждой кривой сильно отличаются ( $\pm 2^\circ$ ). Данные различия кривых можно объяснить влиянием наведенного сгустками запирающего напряжения, про-

порционального величине заряда, которое не полностью компенсируется модулятором катодно-сеточного узла. Кроме того, на форму кривых влияют колебания интенсивности электронного потока в зазоре катод–сетка, характерные для переходных процессов и зависящие от запирающего напряжения [9]. Надо заметить, абсолютное значение фазы ВЧ пушки  $40^\circ$  не так важно для настройки режимов группировки преинжектора (для примера подойдут фазы  $38^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $42^\circ$ ), а важна ее повторяемость от раза к разу при калибровках.

### 3.2. Калибровка напряжения в ВЧ пушке

Предварительная калибровка напряжения в ВЧ пушке производилась по измеренным коэффициентам связи измерительных петель, характеристик резонатора ВЧ пушки (добротность, характеристическое сопротивление) и по измеренной падающей ВЧ мощности с направленного ответвителя в тракте от генератора. При этом влияли неточности при измерении характеристик петель, ВЧ пушки и направленного ответвителя. Наиболее точная калибровка была проведена по измерению времени пролета сгустков между двумя датчиками FCT. Из расчетов следует, что максимальная энергия частиц из ВЧ пушки (при определенной фазе ВЧ) меньше





**Рис. 7.** Измерения зависимости задержки пролета сгустков (а), разности минимальных задержек от теоретической зависимости (b) и вид импульсов (FCT2 сдвинут на  $-7 \text{ ns}$ ) (c).

напряжения на пушке на  $\sim 1\%$ . Поэтому с хорошей точностью напряжение на ВЧ пушке можно измерять по максимальной энергии частиц пучка, конкретнее, частиц переднего фронта сгустков. Эта энергия была измерена по времени пролета между двумя датчиками FCT с точностью  $0.02\%$ .

Измерения проводились для ряда фаз и ряда напряжений на ВЧ пушке ( $600\text{--}900 \text{ kV}$ ), которые задаются уровнями системы автоматической регулировки усиления АРУ (или AGC — Automatic Gain Control):  $AGC = 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5$  и  $9$  (рис. 7, а). Эти напряжения ( $\varepsilon$ ) вычисляются с помощью коэффициента  $K$  ( $\varepsilon = K \cdot AGC$ ), который следует установить при помощи калибровки.

Из полученных семи зависимостей задержек от фазы определялись минимальные значения задержек, соответствующих максимальной энергии частиц и сравнивались с расчетными задержками ( $\tau$ ), полученными из релятивистской зависимости скорости  $\beta = v/c$  от энергии частиц  $\varepsilon$ :

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon/mc^2)^2}},$$

где  $m$  — масса электрона,  $c$  — скорость света,  $\varepsilon$  — энергия частиц, задаваемая системой АРУ.

Измеряемая задержка между импульсами на осциллографе равна сумме задержек сгустков между датчиками FCT1, FCT2, разделенных расстоянием  $S$  и в кабелях с разностью длин  $L$ :

$$\tau = \frac{S}{\beta c} + \frac{L}{c/1.52}. \quad (2)$$

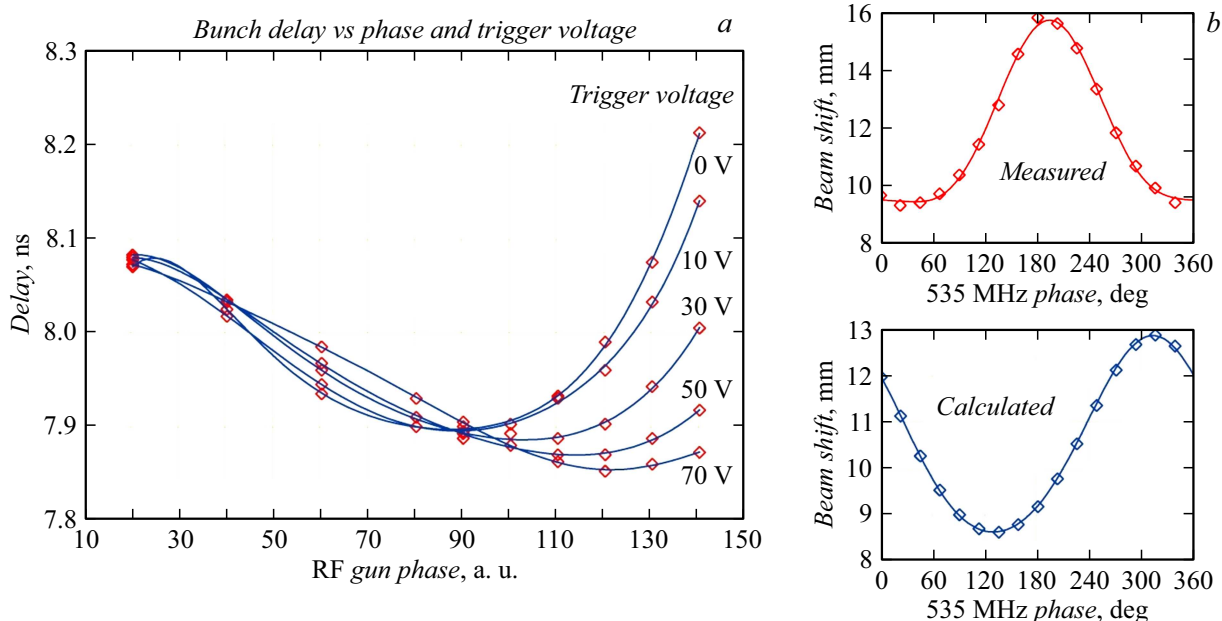
Таким образом, задержка определяется тремя параметрами:  $K$ ,  $S$ ,  $L$ . Все три параметра (табл. 2) были определены методом наименьших квадратов разницы измеренных задержек с вычисленными по формуле (2).

**Таблица 2.** Результаты калибровки напряжения ВЧ пушки

$K$ , кеV/V	$S$ , m	$L$ , m
99.81952	2.12504	0.0229

На рис. 7, b измеренная зависимость задержек показана красной кривой (Delay), а разница измеренной кривой с вычисленной показана коричневой (Difference — правая шкала в пикосекундах). Из графика следует, что rms точность данной калибровки составляет  $0.02\%$ .

При калибровке использовался осциллограф фирмы ROLDE-SCHWARZ с полосой  $4 \text{ GHz}$  и частотой дискретизации  $20 \text{ GSAMPL/s}$ . Каждое измерение усреднялось по  $10$  импульсам. Ограничение полосы частот приводит к специфическому искажению фронта импульсов с датчиков FCT, имеющих также свою ограниченную полосу. На рис. 6, b для примера показан результат ограничения спектра частот в разложении в ряд Фурье для расчетного импульса тока в сгустке. Такая результирующая форма импульса соответствует типичным изображениям с экрана осциллографа (рис. 7, c). В нем появляется волна провала с положительными значениями на переднем фронте (на графике рис. 7, c сигнал от электронных сгустков отрицательный) и колебания в хвостовой части. При калибровке измерялось время прихода фронта на полувысоте между положительными уровнями волны провала и минимумами импульсов. Данный подход практически показал хорошую точность измерений. Кстати, ограничение спектра импульса не приводит к изменению значения интеграла от импульса тока по времени, т.е. заряда импульса. Поэтому при измерении заряда (рис. 6) интегрировались все значения формы измеряемого импульса вместе с провалами.



**Рис. 8.** Зависимости задержек пролета сгустков от фазы ВЧ пушки и отпирающего напряжения катода (а) и отклонения в корректирующей катушке при калибровке фазы резонатора 535.5 MHz для отпирающего напряжения 0 V и рабочей фазы ВЧ пушки  $40^\circ$  (0.3 nC) (b).

### 3.3. Калибровка фазы резонатора третьей гармоники (535.5 MHz)

Калибровка фазы резонатора третьей гармоники должна проводиться индивидуально для каждой рабочей фазы ВЧ пушки и рабочего напряжения отпирающего катода в ней (для заряда в сгустке 0.3 или 1 nC). Это связано с тем, что время вылета сгустков из ВЧ пушки, или их фаза вылета, зависят от этих параметров, как следует из рис. 8, а. На рис. 8, а представлены результаты измерений времени пролета сгустков между двумя датчиками FCT в зависимости от фазы ВЧ пушки и отпирающего напряжения катода. Данная зависимость, как и зависимость фазы в максимуме заряда от отпирающего напряжения, возникает по изложенным выше причинам.

При калибровке использовалось измерение поперечного отклонения сгустков в корректоре (с фиксированным отклоняющим полем) из-за изменяющейся энергии сгустков при варьировании фазы резонатора 535.5 MHz. Энергия сгустков изменяется в пределах  $\pm 150$  keV при варьировании фазы от 0 до  $360^\circ$ . Полученная зависимость (как и расчетная) интерполируется первыми двумя членами ряда Фурье и сравнивается с расчетной. Из сравнения этих двух зависимостей вычисляется калибровочный сдвиг фазы, устанавливаемой с пульта. На рис. 8, b приведены результаты калибровки для одного из режимов группировки преинжектора (рис. 5), из которых следует, что фазы с пульта (a.u.) должны быть скорректированы на величину сдвига 116.4, чтобы получить реальные фазы в градусах ВЧ 535.5 MHz,

соответствующие моменту вылета из катода центра сгустка.

## Заключение

В работе анализируется динамика пучка в преинжекторе с термокатодной ВЧ пушкой для синхротрона четвертого поколения СКИФ. Приведен краткий обзор существующих в мире термокатодных ВЧ пушек, перечислены их свойства и особенности эксплуатации. Описаны преимущества применения термокатодной ВЧ пушки с сеточным управлением. Приведено описание и конструкция преинжектора с ВЧ пушкой, а также принцип группирования сгустков на основе ВЧ системы преинжектора. Анализируются отличия и особенности работы данного преинжектора по сравнению с аналогичными инжекторами на основе статических пушек. Приводятся результаты численных расчетов и экспериментальных данных процесса группировки сгустков и особенностей взаимодействия пучка с ВЧ системой. Разработан алгоритм настройки группирующей системы. Показано, что 100% прохождение еще не гарантирует получение номинального 1% разброса по энергии в пучке. Для прецизионной настройки необходима периодическая калибровка ВЧ системы, которая должна быть максимально автоматизирована. Разработаны методы калибровки амплитуд и фаз ВЧ пушки и группирующего резонатора.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S.M. Gurov, V.N. Volkov, K.V. Zolotarev, A.E. Levichev. J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **14** (4), 651 (2020).
- [2] C. Christou, V. Kempson, K. Dunkel, C. Piel. *The Preinjector Linac for the Diamond Light Source, Proceed. of LINAC* (Lübeck, Germany, 2004), p. 84–86.
- [3] M. Pedrozzi, M. Dehler, P. Marchand, L. Rivkin, V. Schlott, A. Streun, C. Piel. *Commissioning of the SLS linac, EPAC 2000* (Vienna, 2000), p. 851.
- [4] T. Shaftan, A. Blednykh, E. Blum, W. Cheng, J. Choi, B. Dalesio, M. Davidsaver, J. De Long, R. Fliller, M. Johanson, F. Gao, W. Guo, G. Ganetis, A. Goel, K. Ha, R. Heese, H.-C. Hseuh, S. Kramer, B. Kosciuk, S. Kowalski, Y. Li, W. Louie, S. Ozaki, D. Padrazo, J. Rose, S. Seletskiy, S. Sharma, B. Singh, O. Singh, V. Smaluk, G. Shen, Y. Tian, K. Vetter, W. Wahl, G. Wang, F. Willeke, X. Yang, L.H. Yu, E. Zitvogel, P. Zuhoski. *Status of NSLS-II injector, Proceed. of IPAC 2013* (Shanghai, China, 2013), p. 273–275.
- [5] T. Perron, E. Rabeuf, E. Plouviez, V. Serriere, A. Panzarella, B. Ogier. *New Preinjector for the ESRF Booster, Proceed. of EPAC08* (Genoa, Italy, 2008), p. 2195–2197.
- [6] B. Taylor, H. Lancaster, H. Hoag. *Engineering Design of the Injector Linac for the Advanced Light Source (ALS), Proceed. of the 1988 Linear Accelerator Conference* (Williamsburg, Virginia, USA), p. 565–567.
- [7] X.C. Ma, M.V. Arsenyeva, E.A. Bekhtenev, V.G. Cheskidov, V.M. Borin, G.V. Karpov, Y.I. Maltseva, O.I. Meshkov, D.A. Nikiforov, O.A. Pavlov, V. Volkov. *Beam Instrumentation for Linear Accelerator of SKIF Synchrotron Light Source, IPAC 2021, Proceed. of the 12th International Particle Accelerator Conference* (Campinas, SP, Brazil : JACoW, 2021), p. 1016–1019.  
DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB328
- [8] С. Ма, М.В. Арсентьева, А.М. Батраков, А.Е. Левичев, В.Н. Волков, О.И. Мешков, Ю.И. Мальцева, Д.А. Никифоров, А.В. Павленко, Куаньцзюнь Фань. *Сибирский физический журнал*, **18** (1), 14 (2023).  
DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-1-14-27
- [9] V.N. Volkov, V.S. Arbuzov, E.K. Kenzhebulatov, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, E.V. Kozyrev, S.A. Krutikhin, G.Ya. Kurkin, I.V. Kuptsov, S.V. Motygin, A.A. Murasev, V.K. Ovchar, V.M. Petrov, A.M. Pilan, V.V. Repkov, I.K. Sedlyarov, S.S. Serebnykov, O.A. Shevchenko, M.A. Sheglov, S.V. Tararyshkin, A.G. Tribendis, N.A. Vinokurov. *Test Stand Results of CW 100 mA RF gun for Novosibirsk ERL based FEL in Proc. RuPAC.18* (Protvino, Russia, 2018), p. 507–509.
- [10] V.N. Volkov, V.S. Arbuzov, K.N. Chernov, E.I. Kolobanov, S.A. Krutikhin, G.Ya. Kurkin, E.A. Kuper, I.V. Kuptsov, S.V. Motygin, V.N. Osipov, V.K. Ovchar, V.V. Repkov, V.M. Petrov, I.K. Sedlyarov, G.V. Serdobintzev, S.S. Serebnyakov, M.A. Scheglov, S.V. Tararyshkin, A.G. Tribendis, I.A. Zapryagaev, I.V. Shorikov, A.V. Telnov, N.V. Zavyalov. *CW 100 keV Electron RF Injector for 40 mA Average Beam Current, Proceed. of RuPAC 2014* (Обнинск, 2014), p. 309–311.
- [11] P. Sprangle, J. Penano, B. Hafizi, D. Gordon, S. Gold, A. Ting, C. Mitchell. *Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams*, **14**, 020702 (2011).
- [12] M. Borland. *A High-Brightness Thermionic Microwave Electron gun* (SLAC-402, UC-41 4, (A), February 1991, Ph.D. Thesis)
- [13] V.L. Auslender, V.V. Bezuglov, A.A. Bryazgin, V.A. Gorbunov, V.G. Cheskidov, I.V. Gornakov, B.L. Faktorovich, V.E. Nekhaev, V.S. Podobaeв, A.D. Panfilov, A.V. Sidorov, V.O. Tkachenko, A.F. Tuvik, L.A. Voronin. *Industrial Electron Accelerators Type ILU, Proceed. of RuPAC 2006* (Novosibirsk, Russia, 2006), p. 351–353.
- [14] K. Floettmann. *ASTRA User's Manual*, [http://www.desy.de/mpyflo/Astra\\_dokumentation](http://www.desy.de/mpyflo/Astra_dokumentation)
- [15] V. Volkov, E. Kenjebulatov, S. Krutikhin, G. Kurkin, V. Petrov, E. Rotov, N. Vinokurov. *Thermionic Cathode-Grid Assembly Simulations for rf Guns* (Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia, PAC09, Vancouver, Canada, 4–8 May, 2009), p. 572–574.
- [16] D.G. Myakishev, V.P. Yakovlev. *CLANC2-A Code for Calculation of Multipole Modes in Axisymmetric Cavities with Absorber Ferrites*, *Proceed. of the Particle Accelerator Conference* (NY, 1999), p. 2775–2777.
- [17] *CST Studio Suite Electromagnetic Field Simulation Software*. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [18] A. Levichev, K. Grishina, S. Samoilov, M. Arsentieva, D. Chekmenev, Ma Xiaochao, O. Meshkov, I. Pivovarov, D. Nikiforov, A. Barnyakov. *J. Instrumentation*, **18**, T07001 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/07/T07001
- [19] В.Н. Волков, М.В. Арсентьева, А.М. Барняков, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенеv, Н.Г. Васильева, С.М. Гуров, С.Е. Карнаев, А.А. Кондаков, А.Н. Косарев, С.А. Крутихин, Г.Я. Куркин, А.Е. Левичев, А.Ю. Мартыновский, С.В. Мотыгин, Д.А. Никифоров, В.К. Овчар, А.В. Павленко, О.А. Павлов, М.В. Родякин, Е.А. Ротов, И.К. Седляров, А.М. Семенов, М.Г. Федотов, К.Н. Чернов. *ЖТФ*, **94** (6), (2024).