

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д9-92-455

ТРУДЫ
XIII СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Дубна, 13-15 октября 1992 г.

Том I

Дубна 1993

С-ТАУ ФАБРИКА

УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОИЯИ

В.С.Александров, В.К.Антропов, О.В.Архипов, П.Ф.Белошицкий,
Л.В.Бобылева, Ц.Д.Вылов, Д.И.Калчев, В.И.Казача, Н.Ю.Казаринов,
А.К.Красных, В.И.Миронов, Л.М.Онищенко, Э.А.Перельштейн,
А.Н.Сисакян, Ю.И.Смирнов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Введение

С-тау фабрика является частью проектируемого в ОИЯИ ускорительно-накопительного комплекса, который включает в себя также ускоритель-накопитель тяжелых ионов, источник синхротронного излучения-накопитель позитронов (электронов) с энергией 8-10 ГэВ (НК-10). Первые проектные соображения были изложены в /1,2/. Второй вариант проекта С-тау фабрики в ОИЯИ отличается от первого главным образом следующим. Изменено местоположение ускорительно-накопительного комплекса. Мы изменили также структуру инжекционного комплекса и рассматриваем теперь многосгустковый режим инъекции вместо предыдущего односгусткового для того, чтобы упростить источник электронов и исключить из проекта охладитель-накопитель. Во втором варианте магнитная структура содержит лишь одно место встречи, используется схема с плоским пучком.

Сейчас широко обсуждаются гибридные (перестраиваемые) варианты магнитной структуры для реализации как схемы с плоским пучком, так и схемы с монохронатизацией на одной установке /3,4/. В ОИЯИ рассматривается вариант с изменением эмиттанса пучка и фокусирующих полей в микро-бета-вставке. Регулировка эмиттанса пучка в магнитной структуре достигается как за счет изменения набега фазы, так и за счет использования вигглеров. Для увеличения эмиттанса в стандартной схеме используются вигглеры, расположенные на участках подавления дисперсии. В схеме с монохронатизацией вигглеры расположены на прямолинейных участках.

Расположение ускорительно-накопительного комплекса

Структурная схема и циклограмма С-тау фабрики

В ОИЯИ рассматривались два варианта размещения ускорительно-накопительного комплекса. В первом варианте предполагалось разместить с-тау фабрику на резервной территории ЛЯП ОИЯИ, а накопитель НК-10 должен был охватывать часть существующих лабораторных зданий и сооружений. Для уменьшения сроков реализации комплекса прорабатывалась также идея с размещением единого форинжектора и НК-10 в инициальном здании ЛИУ-30 с использованием сложившейся

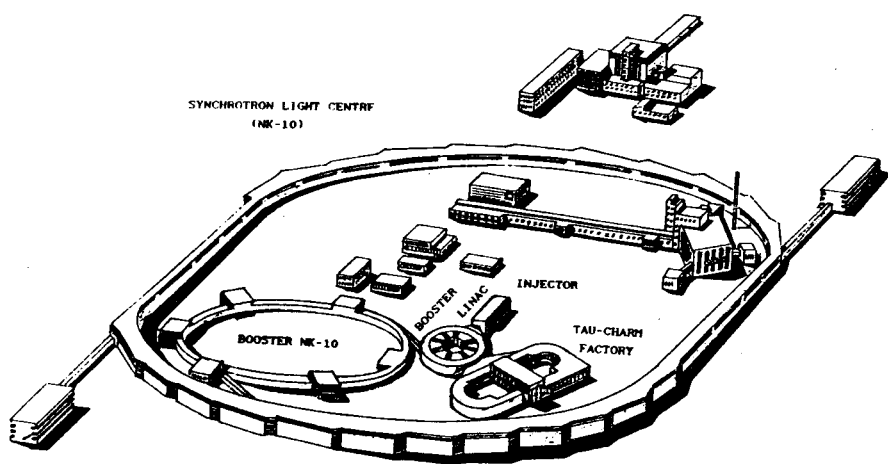


Рис. 1. Расположение ускорительно-накопительного комплекса

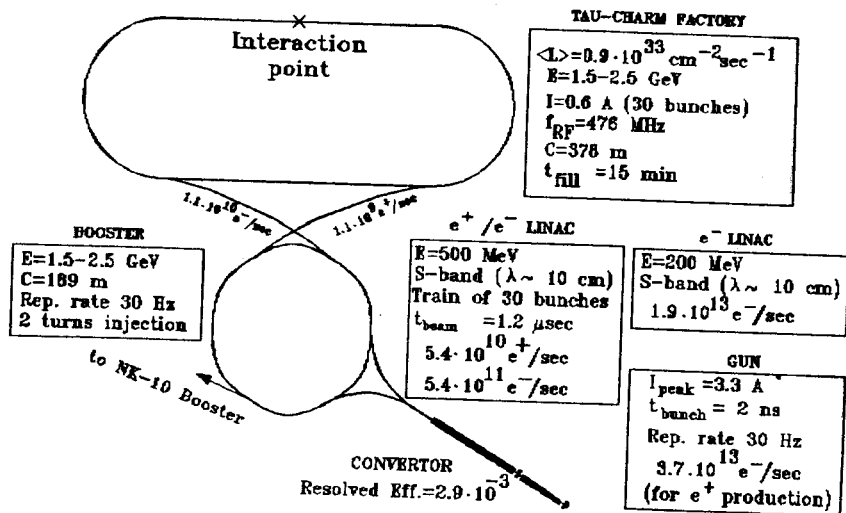


Рис. 2. Расположение и структурная схема С-Тау фабрики

инфраструктуры. Однако расположение существующих зданий и инженерных сооружений не позволило реализовать эти идеи. Сейчас изучается новый вариант, в котором весь комплекс целиком располагается на резервной территории (рис. 1-2)

Инжекционный комплекс состоит из форинжектора и быстрого синхротрона - бустера, в котором электроны и позитроны доускоряются до конечной энергии накопления в основном кольце. Предполагается, что форинжектор в дальнейшем будет использоваться также для начального ускорения частиц для НК-10.

Величина энергии на выходе форинжектора примерно равна 500 МэВ, а количество частиц должно быть таким, чтобы обеспечить одновременную работу С-Тау фабрики и накопительного кольца НК-10. Циклограмма работы инжекционного комплекса: зависимость потока позитронов (α) и светимости (β) от времени показана на рис. 3.

Средние значения светимости обеспечиваются на уровне 80% от максимального значения. Время жизни пучка около 210 мин. Это значение определяется главным образом тормозным излучением частиц в месте встречи. Мы предполагаем получить вакуум в камере накопительного кольца на уровне $2 \cdot 10^{-9}$ Торр. При времени включения (выключения) детектора $t=20$ сек средняя величина светимости достигает максимального значения для времени работы детектора $t=12$ мин, которого достаточно для накопления частиц в НК-10.

Для получения максимальной светимости в С-Тау фабрике должно быть $4,8 \cdot 10^{12}$ позитронов. Принимая во внимание, что эффективность перевода частиц из форинжектора через бустер в С-Тау фабрику порядка 10% и время заполнения выбрано равным 15 мин., мы получаем, что производительность инжекционного комплекса должна быть $5,4 \cdot 10^{10}$ e^+ /сек. Коэффициент конверсии ограничивается разумным энергетическим разбросом ($\approx 1\%$) и эниттансом пучка позитронов, приемлемыми для бустера, и оценивается как 0,3%.

Таким образом, поток электронов, попадающих на конверсионную мишень, должен быть приблизительно $2 \cdot 10^{13}$ e^- /сек. Эффективность баншировки будет порядка 50% и полный поток электронов на пушке должен быть около $3,7 \cdot 10^{13}$ e^- /сек.

Форинжектор

Форинжектор содержит два резонансных линейных ускорителя, работающих в режиме бегущей волны на частоте около 2856 МГц. Один ускоритель с энергией 200 МэВ служит для производства позитронов на конверсионной мишени из вольфрама, другой - для ускорения электронов и позитронов до энергии 500 МэВ. Предполагаемый эниттанс пучка позитронов $3 \cdot 10^{-3}$ см²/рад, энергетический разброс около 1%. Общая длина форинжектора - около

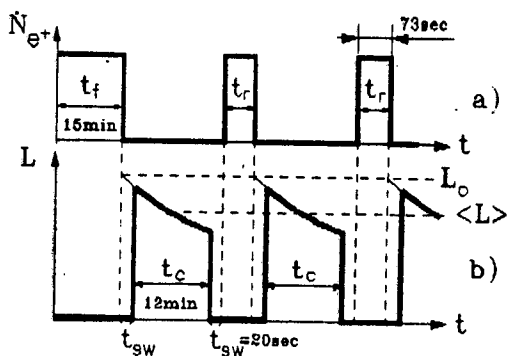


Рис. 3. Циклограмма работы инжекционного комплекса: поток позитронов N_{e^+} из инжекционного комплекса (а) и изменение светимости L (б).

- t_f - время заполнения e^+ ;
- t_r - время восполнения;
- t_c - время работы детектора;
- t_{sw} - время включения (выкл.) детектора;
- $\langle L \rangle$ - средняя светимость

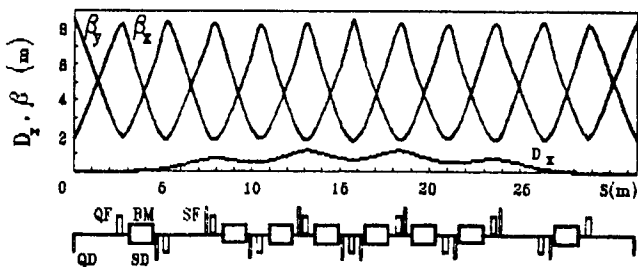


Рис. 4. Структурные функции в суперпериоде бустера

40 м. Запитка ускоряющих волноводов СВЧ-мощностью осуществляется от клистронных усилителей, которые обеспечивают темп набора до 25 МэВ/н. Импульсная мощность на входе ускоряющей секции в регулярной части ускорителя составляет около 25 МВт. Для согласования пучка позитронов на входе во второй ускоритель предполагается использовать ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОЙ преобразователь (QWT). Коэффициент конверсии будет уточнен при дальнейших проработках.

Источником пучка является пушка с сеточным управлением. Вместе с субгармоническим группирователем и группирователем на рабочей частоте она обеспечивает получение последовательности 30 (или 40) сгустков с расстоянием между сгустками 42 нс, длительностью макроимпульса 1.2 нкс в случае двухоборотной инжекции (1.85 нкс при трехоборотной инжекции) и зарядом в сгустке 6.6 (4.4) нК. Пиковый ток при длине макроимпульса 2 нс равен 3.3 (2.2) А. Этот режим генерации последовательности импульсов повторяется с частотой 30 Гц.

Бустер

Бустер - синхротрон проектируется как инжектор С-тау фабрики. Он будет использоваться для ускорения электронов и позитронов с энергией 500 МэВ, которые инжектируются из форинжектора, до конечной энергии С-Тау фабрики. Периметр бустера (189 м) позволяет инжектировать в основное кольцо 15 сгустков за один оборот. Предполагается двух- или трехоборотная инжекция в бустер. При частоте повторения 30 Гц бустер позволяет накапливать в С-Тау фабрике ток позитронов 0.6 А за время около 15 минут и эффективно поддерживать светимость на уровне $10^{23} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Магнитная структура бустера включает в себя шесть суперпериодов, которые содержат по 6 ячеек типа FODO. Форму бустера (шестиугольник) определяет расположением инжекционных каналов в выбранной конфигурации комплекса. Два больших прямолинейных проехутка бустера отведены для размещения устройств ввода, три для вывода в каналы инжекции С-Тау фабрики и бустера НК-10, на шестом устанавливается ВЧ-станция.

Каждый суперпериод включает в себя три стандартные ячейки типа FODO, две ячейки, содержащие по одному поворотному магниту, для подавления дисперсии, и один прямолинейный проехуток. Положение фокусирующих и дефокусирующих квадрупольей (QF, QD: $L=0.3 \text{ м}$, $B_{\text{макс}}=k_1 \cdot Vr=15 \text{ Тл}$), магнитов Н-типа (BM: $L=1.3 \text{ м}$, $B_{\text{макс}}=0.84 \text{ Тл}$) и секстипольей (SD, SF: $L=0.15 \text{ м}$, $g_{\text{макс}}=K_2 \cdot Vr = 0.5 \cdot Vr' = 110 \text{ Тл}$) показано на рис. 4.

Структурные функции для одного суперпериода также показаны на рис. 4. Горизонтальная и вертикальная бета - функции имеют максимальные значения, равные 1.8 и 8.5 м. Максимальное значение дисперсии $D_x=1.2 \text{ м}$,

в области больших прямолинейных проехуток $D_x < 1$ мм. При длине ячейки 5.25 м и значениях $Q_x = 8.55$ и $Q_z = 8.62$ достигается эмиттанс $\epsilon_e = 1.2 \cdot 10^{-7}$ н·рад.

Таблица 1

Энергия пучка (ГэВ)	2.5
Эмиттанс (2.5 ГэВ) ϵ_e (н·рад)	$1.2 \cdot 10^{-7}$
Ток I_{e-}/I_{e+} (нА)	6/0.6
Энергетический разброс σ_E/E	$7 \cdot 10^{-4}$
Периметр (м)	189.
Частота повторения (Гц)	30
Частоты бетатронных колебания Q_x/Q_z	8.55/8.62
Коэффициент расширения орбит	0.0193
Радиус поворота ρ (м)	9.93
Времена затухания $\tau_x/\tau_z/\tau_s$ (мсек)	9./9./4.5
Кратность	300
Потеря энергии на оборот (МэВ)	0.35
Ускоряющее напряжение (МВ)	2.5

Для коррекции хроматичности $\xi_x = -10.6$ и $\xi_z = 10.4$ используются два сепаратора секступолей, расположенных рядом с фокусирующими и дефокусирующими квадрупольями. Чтобы избежать появления зависящей от времени секступольной компоненты, мы предлагаем использовать неметаллические вакуумные камеры в дипольных магнитах.

В бустере используется высокочастотная система с частотой 500 МГц. Максимальное высокочастотное напряжение, требующееся для ускорения, компенсации потерь синхротронного излучения и получения приемлемого продольного размера сгустка σ_s , приведено в табл.1, в которую сведены основные параметры бустера.

Главное кольцо

Электрон - позитронный коллайдер содержит два накопительных кольца (рис.5), каждое периметром 377.8 м, расположенных в одном туннеле на разной высоте с расстоянием между дорожками 1.3 м. В середине одного из прямолинейных проехуток длиной 100 м размещается универсальный детектор, который проектируется в настоящее время в ОИЯИ. Конструктивно с детектором совмещены микро-бета-вставки (два триплета сверхпроводящих квадрупольных линз), расположенные симметрично относительно места встречи и обеспечивающие значение вертикальной β -функции в месте встречи около 1 см. Градиент сверхпроводящих квадрупольей ≈ 30 Тл/м для максимальной энергии частиц 2.5 ГэВ. Два квадруполья имеют длину по 0.5 м, третий - 0.2 м. Структурные функции в области места встречи показаны на рис.6. На прямолинейных проехутках размещаются также электростатические сепараторы, вертикальные отклоняющие магниты и линзы для разведения электронного и позитронного пучков по дорожкам, инжекционные устройства, ВЧ-резонаторы для компенсации энергетических потерь на синхротронное излучение и поддержания продольного размера сгустков

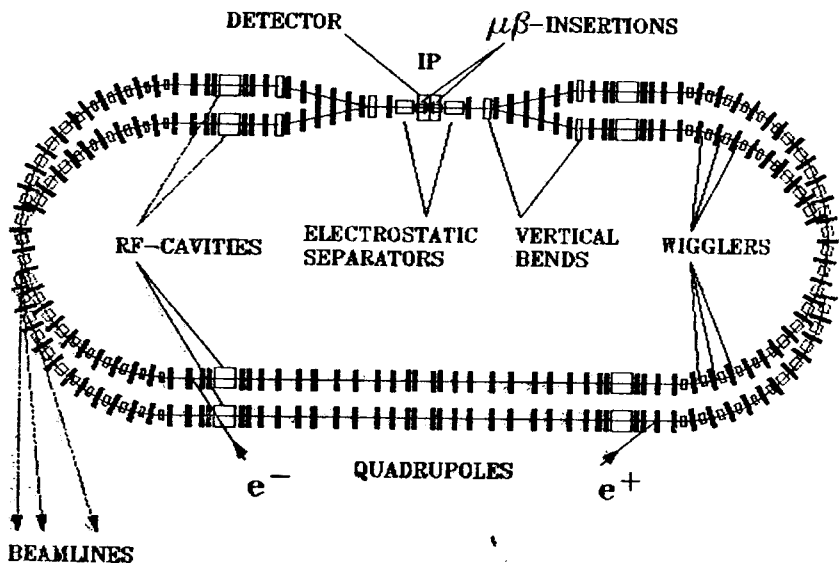


Рис. 5. Принципиальная схема С-тау фабрики

меньшим 1 см, а также дипольные вигглеры, предназначенные для получения необходимого энергетического разброса при энергиях, меньших 2.2 ГэВ. Напряженность электрического поля в сепараторе и его длина выбраны таким образом, чтобы расстояние между последовательными сгустками составляло примерно 12.6 н. Число сгустков каждой компоненты в кольце равно 30. Напряженность электрического поля ограничена значением 2.5 МВ/м для того, чтобы избежать пробоя, когда пучок с большим током проходит через сепаратор. Длина сепаратора составляет 3.4 м. Эти параметры сепаратора дают вертикальное отклонение на выходе 5.8 мм. Вертикальный размер пучка в этой точке равен $\sigma_y = 20.43$ мм. Таким образом, мы имеем вертикальное разделение сгустков около $27\sigma_y$ в паразитном месте встречи. Малое значение вертикального угла отклонения $\phi \approx 3.4$ град после прохождения электростатического сепаратора недостаточно для разведения пучков в два кольца. Мы используем дополнительно теплую линзу Q_4 , расположенную после сепаратора, и имеем вертикальное отклонение на входе первого вертикального поворотного магнита порядка 40 мм. Другим положительным свойством линзы Q_4 является малое значение критической энергии излученных фотонов и, как результат, уменьшение фона в месте встречи по сравнению с использованием вертикального поворотного магнита вместо Q_4 . В нашем случае максимальную энергию имеют фотоны, излучаемые на первом

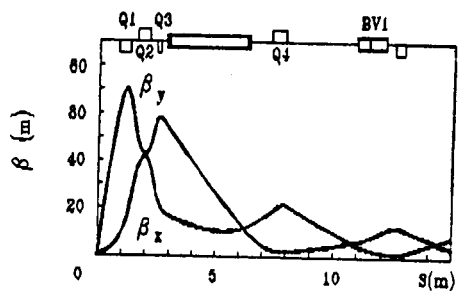


Рис. 6. Структурные функции на участке встречи

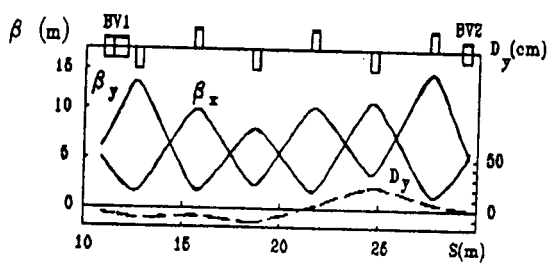


Рис. 7. Структурные функции на участке вертикального разведения пучков

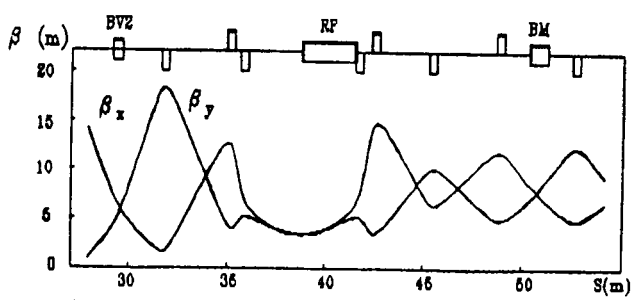


Рис. 8. Структурные функции на участке расположения ВЧ-резонаторов

вертикальном повороте (критическая энергия - 0.5 кэВ), полная мощность излучения в области места встречи оценивается как 100 В. Структурные функции для области вертикального разделения показаны на рис.7.

Для участка прямолинейной секции, где разнечаются ВЧ-резонаторы, структурные функции показаны на рис.8. Чтобы уменьшить взаимодействие пучка с поперечными модами ВЧ-резонаторов, значение β -функции минимизируется с помощью специальных дублетов.

Таблица 2

Энергия при максимальной светимости, ГэВ	2.2
Максимальная энергия, ГэВ	2.5
Светимость, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{23}$
Число мест встречи	1
Время жизни пучка, час.	3.5
Периметр, м	378
Коэффициент расширения орбит	0.0351
Эмиттанс, нм	482
Энергетический разброс	$5.87 \cdot 10^{-4}$
Рабочая частота ВЧ-системы, МГц	476
Ускоряющее напряжение, МВ	18
Кратность	600
Длина сгустка, нм	7.5
Расстояние между сгустками, м	12.6
Число сгустков	30
Полный ток, нА	614
Потери энергии на оборот, кэВ/оборот	201
Мощность синхротронного излучения, кВт	123
Время затухания $\tau_{x,y} / \tau_E$, нс	27/14
Бета-функция в месте встречи, м	
горизонтальная	0.20
вертикальная	0.01
Горизонтальный размер пучка в месте встречи, м	303
Вертикальный размер пучка в месте встречи, м	15
Параметр пространственного заряда	0.035

При проектировании высокочастотной системы С-Тау фабрики возникают жесткие ограничения, связанные с обеспечением односгустковой и многосгустковой устойчивости пучков. Планируется использовать сверхпроводящие резонаторы, подобные резонаторам В-фабрики в CERN/6/, с применением специальных мер для подавления высших мод. Высокочастотная система С-Тау фабрики должна компенсировать потери энергии частиц на синхротронное излучение и возбуждение высших мод в резонаторах (потери мощности SR равны 174 кВт для частиц с энергией 2.2 ГэВ). Высокочастотная система состоит из 4 сверхпроводящих ускоряющих резонаторов (на одно кольцо), которые расположены на концах

длинных прямолинейных проехуток. Каждый резонатор содержит три ячейки. Частота выбрана равной 476 МГц. Одногустковая и многогустковая устойчивость пучков должна обеспечиваться системой обратной связи. Выбранная частота позволяет поддерживать необходимые продольные размеры пучка при умеренном ускоряющем напряжении в сверхпроводящих резонаторах. Продольный размер пучка равен 7 нм для амплитуды ускоряющего напряжения ≈ 18 МВ.

Каждая арка С-ТАУ фабрики содержит по 12 ячеек периодичности типа FODO с набегом фазы по 60 градусов в каждой. Регулярная часть состоит из 6 ячеек с углом поворота 10 градусов на каждую магнит и двух участков подавления дисперсии, содержащих по 3 ячейки с половинным углом поворота на магнит. На участках подавления дисперсии устанавливаются вигглеры для регулировки эмиттанса. Используя вигглеры с магнитным полем $B=1.7$ Тл и общей длиной $l_w=5.2$ м, мы можем поддерживать продольный размер сгустков постоянным при изменении энергии и обеспечить изменение эмиттанса как E^2 . Для коррекции хроматичности используются два семейства секstupольных линз, расположенных стандартным образом. Динамическая апертура для $\Delta r/p=0$, вычисленная с помощью MAD8, при минимизации влияния наиболее опасных резонансов третьего порядка путем уменьшения биения структурных функций в подавителе дисперсии равна $37\sigma_x \times 37\sigma_y$.

Разработка алюминиевой вакуумной камеры в поворотном магните и поглотителей синхротронного излучения позволяет локализовать газовую нагрузку в месте расположения высоковакуумных насосов. Главным источником газовой нагрузки в вакуумной камере является газовыделение, вызванное синхротронным излучением. Использование высокопродуктивных ионных и титановых насосов обеспечивает необходимое давление $\approx 2 \cdot 10^{-9}$ торр в вакуумной камере. Предельное давление на насосе лучше, чем $7 \cdot 10^{-11}$ торр, и скорость откачки порядка 10^3 л/сек. Для улучшения вакуума также предполагается использовать распределенные гетерные насосы.

Основные параметры С-ТАУ фабрики даны в табл.2.

Литература

1. V.S.Alexandrov, V.K.Antropov, O.V.Arkipov et.al. JINR tau-charm considerations. IEEE Particle Accelerator Conference, San-Francisco, Calif., 1991, v.1, p.195.
2. JINR c-tau factory. Proceedings of Workshop on JINR c-tau factory. JINR E1, 9, 13-92-98, Dubna, 1992.
3. A.Faus-Golfe and J.Le Duff. A versatile lattice for a tau-charm factory that includes a monochromatization scheme. Preprint LAL/RT 92-01, Orsay, 1992.
4. P.F.Beloshitsky. Notes to a tunable lattice for realization flat beam and monochromatization schemes of tau-charm factory. Preprint JINR, E9-92-187, Dubna, 1992.
5. ESRF.Fundamental phase Report. B.P.220-38043 Grenoble Cedex,