

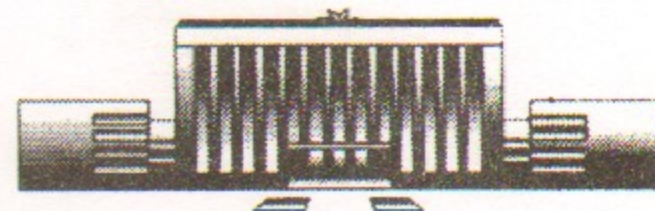
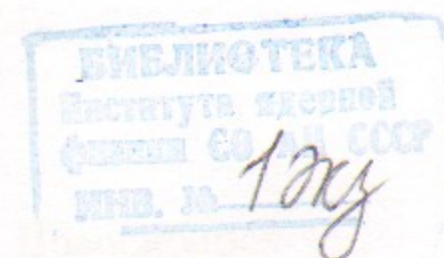
Г 93
1997

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН

К.В. Губин А.Г. Иголкин П.В. Мартышкин

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ
ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ
ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5**

ИЯФ 97-100



Новосибирск

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5

К.В. Губин А.Г. Иголкин П.В. Мартышкин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

В работе оценено влияние теплового режима ускоряющей секции на параметры ускоряемого пучка. Получены оценки точности стабилизации средней температуры ускоряющих секций форинжектора ВЭПП-5 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ и максимально допустимого перепада температуры вдоль секции $- 1.2^\circ\text{C}$. Изложен метод расчета теплового режима секций, экспериментально проверенный на прототипе форинжектора ВЭПП-5. Получены количественные критерии выбора технических параметров и режимов работы системы термостабилизации при стабилизации ускоряющих секций с помощью охлаждающего дистиллята.

©Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

Введение

Необходимость разработки системы термостабилизации основных СВЧ-элементов инжекционного комплекса со всей остротой была подтверждена при испытании прототипа форинжектора [1], т.к. изменение температурного режима ускоряющей секции приводит к увеличению энергетического разброса в пучке ускоряемых частиц. Система термостабилизации должна компенсировать разброс СВЧ-параметров изготовленных ускоряющих секций, а также удовлетворять требованию: вклад нестабильности теплового режима ускоряющей секции в энергетический разброс пучка должен составлять не более 0.5%.

Для определения требований к техническим параметрам системы термостабилизации проведены оценки влияния температурной нестабильности ускоряющей структуры на энергетический разброс в пучке и получена точность стабилизации рабочей температуры секции, построена модель нестационарного нагрева ускоряющей структуры, на основе численного анализа которой получены критерии выбора и оценки технических параметров системы термостабилизации, изготовлен прототип данной системы и проведены его испытания [1].

1. Влияние тепловых эффектов на энергетический разброс в пучке

Изменение температурного режима ускоряющей структуры приводит к изменению ее СВЧ-характеристик, вследствие чего в пучке заряженных частиц появляется дополнительный энергетический разброс, а также изменяется средняя энергия пучка.

Рассмотрим продольное движение ультрарелятивистских частиц в поле бегущей СВЧ-волны, пренебрегая коллективными эффектами и взаимодействием пучка со структурой ускоряющей секции. В этом случае для

энергии, набираемой частицей в поле бегущей волны, можно записать

$$\frac{dE}{dz} = A \cos \phi(z) \quad (1)$$

где A – темп ускорения в секции, а $\phi(z) = -\omega t + \omega z/(c\beta_\phi) + \phi_0$ – фаза ускоряющего поля, в которой находится частица. В случае, когда в результате изменения температурного режима секции фазовая скорость волны стала отлична от скорости частицы (равной скорости света): $\beta_\phi = 1 + \Delta\beta_\phi$, при малых значениях $\Delta\beta_\phi$ ($\Delta\beta_\phi L/\lambda \ll 1$) энергия, набираемая частицей в секции

$$\Delta E = -\frac{A\omega\Delta\beta_\phi}{c} \left(\sin \left(\phi_0 - \frac{\omega\Delta\beta_\phi L}{c} \right) - \sin \phi_0 \right) \quad (2)$$

Для сгустка фазовой длительностью 2ϕ вклад тепловых эффектов в энергетический разброс определяется как

$$\delta = \frac{E_{0min} - E_{min}}{E_{0max}} = \frac{\omega}{2c} \Delta\beta_\phi L \sin \phi \quad (3)$$

где E_{0min} и E_{0max} – минимальная ($\phi_0 = \phi$) и максимальная ($\phi_0 = 0$) набираемая энергия при $\Delta\beta = 0$, а E_{min} – минимальная энергия при $\Delta\beta \neq 0$.

Связь между смещением резонансной частоты ускоряющей структуры и фазовой скоростью волны может быть записана в следующем виде [2]

$$\frac{\Delta\beta_\phi}{\beta_\phi} = \frac{\beta_\phi}{\beta_{ep}} \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (4)$$

В свою очередь при изменении средней температуры секции

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \alpha \Delta T_{cp} \quad (5)$$

где α – коэффициент линейного расширения меди.

Соотношение (3) совместно с (4) и (5) определяет максимально допустимое изменение средней температуры ускоряющей секции при заданном ограничении энергетического разброса, вызванного тепловыми эффектами.

$$\Delta T_{cp} = \frac{\lambda}{L} \frac{\beta_{ep}}{\pi\alpha\beta_\phi \sin \phi} \delta \quad (6)$$

Аналогичным образом можно показать, что для линейного распределения температуры вдоль секции максимально допустимый перепад температуры ΔT будет

$$\Delta T = 6\delta \frac{\lambda}{L} \frac{\beta_{ep}}{\pi\alpha\beta_\phi \sin \phi} \quad (7)$$

Для ускоряющей структуры прототипа форинжектора параметр β_{ep}/β_ϕ составляет $2 \cdot 10^{-2}$. Выбирая дополнительный энергетический разброс не более 0.5% для сгустка частиц с фазовой протяженностью около 20° , получаем требование: система термостабилизации должна обеспечивать стабилизацию средней температуры ускоряющей секции на заданном с точностью уровне $\pm 0.1^\circ C$, одновременно с удержанием перепада температуры вдоль секции на уровне не более $1.2^\circ C$.

2. Тепловой режим ускоряющей структуры

Ускоряющая секция (рис. 1) представляет собой круглый диафрагмированный медный волновод (ускоряющая структура), помещенный в кожух из нержавеющей стали (рубашка), служащий для придания жесткости. Внутренняя поверхность рубашки и внешняя поверхность структуры образуют канал водяного охлаждения кольцевого сечения. Основные параметры секции приведены в таблице 1. Такая конструкция определяет выбор метода термостабилизации – стабилизация температуры и расхода охлаждающего дистиллята.

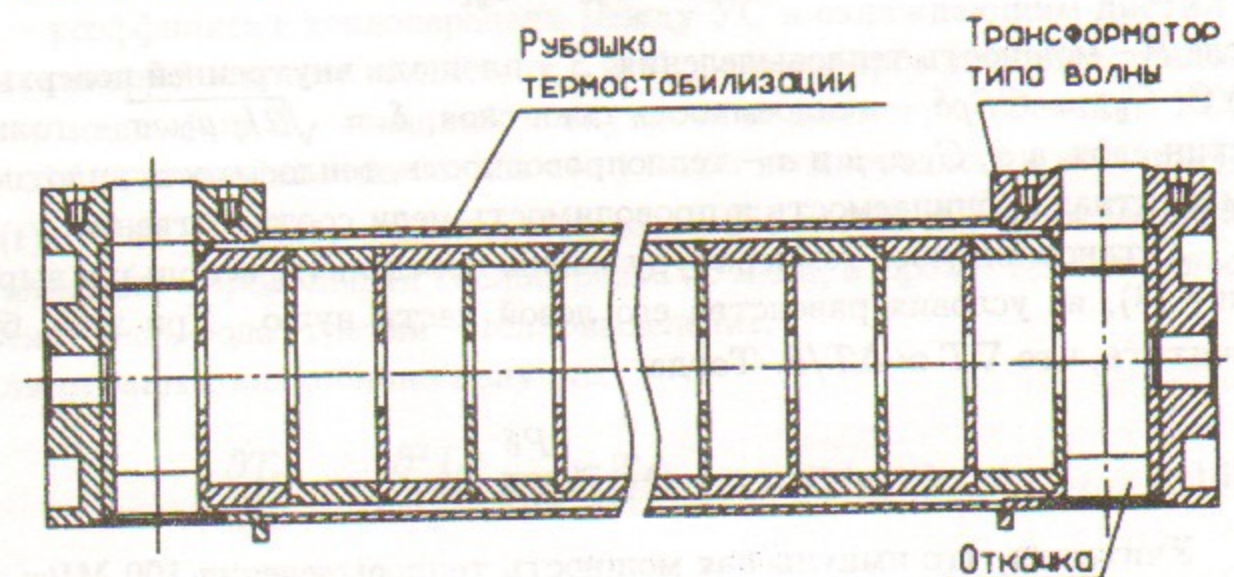


Рис. 1: Общий вид ускоряющей секции.

Таблица 1: Параметры ускоряющей секции.

Длина	280 см
Внутренний диаметр УС	84 мм
Внешний диаметр УС	100 мм
Внутренний диаметр рубашки	108 мм
Внешний диаметр рубашки	112 мм
Рабочая частота	2856 МГц
Частота повторения СВЧ импульсов	50 Гц
Длительность СВЧ импульса	0.5 мкс
Тепловыделение в импульсе	до 80 Дж

При заполнении ускоряющей структуры (УС) СВЧ-полем часть энергии выделяется в скин-слое на внутренней поверхности УС, причем мощность тепловыделения распределена по длине следующим образом

$$P(x) = P_0 e^{-2bx}$$

где $b \approx 0.125 \text{ м}^{-1}$ – коэффициент затухания УС (см. [1]). Для оценки нагрева внутренней поверхности УС за время ВЧ-импульса воспользуемся уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{P}{C_{yc}} - \frac{\alpha S}{C_{yc}} \nabla^2 T \quad (8)$$

где P – мощность тепловыделения, S – площадь внутренней поверхности УС, $C_{yc} = CS\rho\delta$ – теплоемкость скин-слоя, $\delta = \sqrt{2/\mu\mu_0\omega\sigma}$ – толщина скин-слоя, α , C , ρ , μ и σ – теплопроводность, теплоемкость, плотность, магнитная проницаемость и проводимость меди соответственно.

Установившуюся температуру можно определить, используя выражение (8), из условия равенства его левой части нулю. При этом будем считать, что $\nabla^2 T \approx \Delta T/\delta$. Тогда

$$\Delta T \approx \frac{P\delta}{\alpha S}$$

Учитывая, что импульсная мощность тепловыделения 100 МВт, глубина скин-слоя 10^{-6} м и площадь внутренней поверхности УС 2 м^2 получим, что нагрев скин-слоя к концу СВЧ-импульса составит примерно 0.13°C . Принимая во внимание, что без отвода тепла этот нагрев составил бы около 20°C , можно сделать вывод – даже за время импульса,

а тем более уже через несколько микросекунд после него выделяющееся тепло практически равномерно распределяется по радиусу УС. При тепловыделении за один СВЧ-импульс 80 Дж УС в среднем нагревается на $2 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$.

Приведенные оценки показывают, что распределением температуры по радиусу УС, а также и импульсным характером нагрева можно пренебречь и при анализе теплового режима ускоряющей секции рассматривать одномерную модель с квазистационарным нагревом: длинный тонкий медный стержень (ускоряющая структура – УС) с неравномерным по длине тепловыделением, заключенный в цилиндрический кожух (водяная рубашка). По каналу кольцевого сечения, образованному внешней поверхностью УС и внутренней поверхностью рубашки протекает охлаждающий (и термостабилизирующий) дистиллят. Тепловой контакт с окружающим воздухом и потоки тепла через торцы не рассматриваются.

В таком приближении для УС можно записать

$$\frac{\partial T_{yc}}{\partial t} = \eta_1 \frac{\partial^2 T_{yc}}{\partial x^2} + a_1 k_1 (T_{yc}(x, t) - T_0(x, t)) + a_1 P(t) e^{-\beta x} \quad (9)$$

Здесь:

$$\eta_1 = \alpha_{cu} / (\rho_{\text{эф}} C_{cu})$$

$$a_1 = (\rho_{\text{эф}} C_{cu} (D^2 - d^2) \pi / 4)^{-1}$$

k_1 – коэффициент теплопередачи между УС и охлаждающим дистиллятом, который опишем позднее, α_{cu} и C_{cu} – теплопроводность и теплоемкость меди, D и d – внешний и внутренний диаметры обечайки УС, $\rho_{\text{эф}}$ – эффективная плотность меди (с учетом неоднородности по длине), $\int_0^L P(t) e^{-\beta x} dx = P_0(t)$ – полная мощность ВЧ-потерь в секции. Первый член описывает продольный теплоперенос по меди, второй – теплоперенос на стенке медь-вода, третий – тепловыделение.

Для рубашки аналогично получим

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \eta_2 \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + a_2 k_2 (T_p(x, t) - T_0(x, t)) \quad (10)$$

здесь

$$k_2 = 2rk_1/D$$

$$\eta_2 = \alpha_{fe} / (\rho_{fe} C_{fe})$$

$$a_2 = (\rho_{fe} C_{fe} (R^2 - r^2) \pi)^{-1}$$

ρ_{je} , α_{je} и C_{je} - плотность, теплопроводность и теплоемкость нержавеющей стали, R и r - внешний и внутренний радиусы рубашки.

Для элемента воды dx в канале охлаждения изменение температуры определяется следующим выражением

$$T_o(x+dx, t+dt) = T_o(x, t) + a_3 dx (k_1(T_{yc}(x, t) - T_o(x, t)) + k_2(T_p(x, t) - T_o(x, t))) \quad (11)$$

причем условие $dx = vdt$ - явно учитывает движение воды по каналу. Скорость течения воды в канале охлаждения v удобно выразить через ее расход Q следующим образом $v = Q/(\pi(r^2 - D^2/4))$ -

$$a_3 = (Q\rho_o C_o)^{-1}$$

Q , ρ_o и C_o - расход, плотность и теплоемкость воды соответственно.

Погонный коэффициент теплопередачи k_1 от цилиндрической стенки радиуса R и кольцевого водяного канала с зазором δ в воду рассчитывается следующим образом [3]:

$$k = \pi R \lambda Nu / \Delta$$

где λ - теплопроводность воды, Nu - число Нуссельта. В свою очередь для наших условий

$$Nu = 2.3 \cdot 10^{-2} Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

где

$$Re = 2Q/(\pi \nu R) - \text{число Рейнольдса}$$

$$Pr = \nu \rho C / \lambda - \text{число Прандля}$$

ρ , C , ν - плотность, теплоемкость и вязкость воды. Такой расчет коэффициента теплопередачи справедлив для чисел Рейнольдса в диапазоне от 10^4 до 10^6 .

Система уравнений (9) - (11) дополняется следующими граничными условиями - отсутствие теплосъема через торцы УС и начальными распределениями температуры УС, рубашки охлаждения и воды. Аналитическое решение такой системы в общем случае весьма затруднительно. Поэтому была реализована явная разностная схема для численного расчета.

Эта модель проверена на прототипе ускоряющей секции и системе термостабилизации (рис. 2) прототипа форинжектора ВЭПП-5 [1]. Стабилизация температуры дистиллята на входе ускоряющей секции (5) осуществляется управляемым догревом дистиллята из общего контура до

заданной температуры по принципу прямого пропорционального регулирования. Сигналы с термодатчика (2) на входе в нагреватель (3) и расходомера (1) поступают через АЦП в управляющую ЭВМ (11), где на их основе вычисляется необходимая мощность нагрева. Ведется контроль температуры на входе (4) и выходе (6) ускоряющей секции. В качестве термодатчиков используются термисторы YSI44104 и их аналоги на основе термосопротивлений С2-19, позволяющие регистрировать изменения температуры с точностью $0.03^\circ C$ в диапазоне $15 \div 40^\circ C$. В качестве нагревателя используются водяные ТЭНы общей мощностью до 16 кВт, источником питания для которых является управляемый тиристорный ключ с фазовым регулированием, собранный на тиристорах Т-160. Расход дистиллята измеряется расходомером ШРТМ-1.0 с точностью $1 \div 2\%$. Достигнута точность стабилизации $0.1^\circ C$ в рабочем диапазоне температуры $25 \div 35^\circ C$ и расхода дистиллята $0.1 \div 0.3 \text{ л/с}$. Постоянная времени системы составляет около 20 сек.

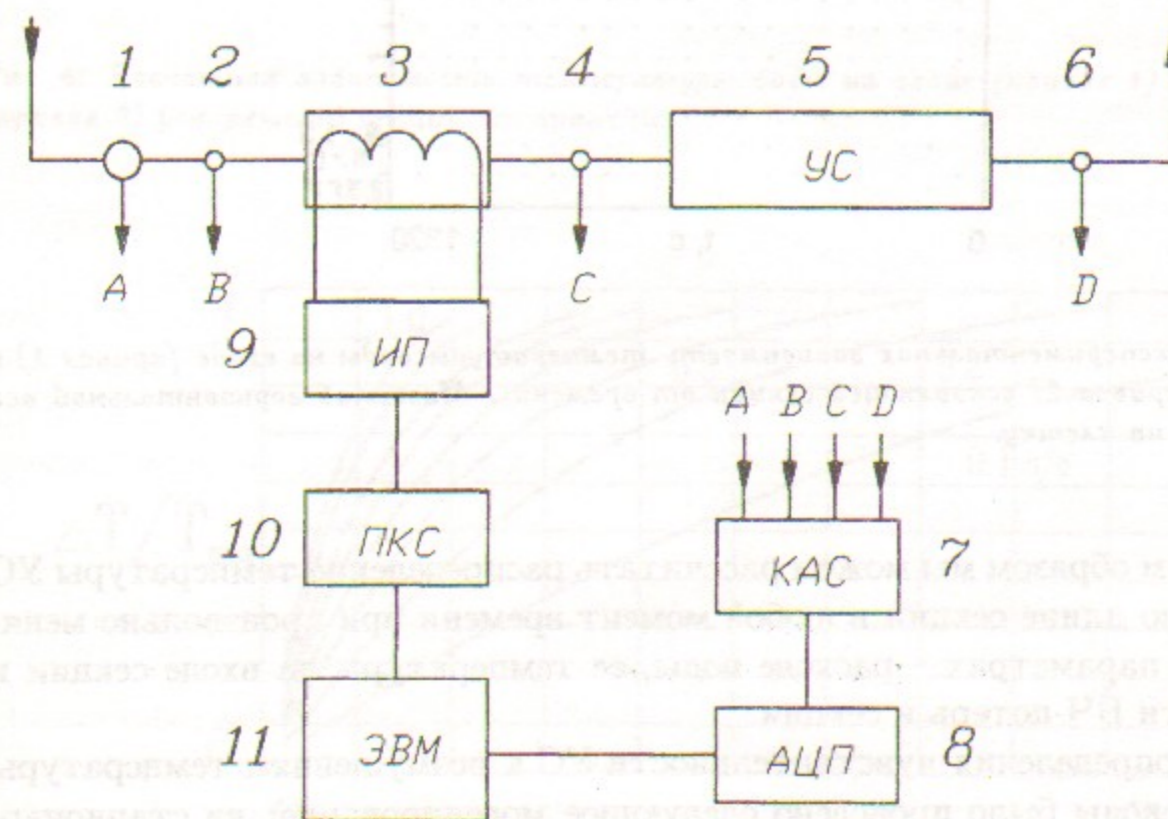


Рис. 2: Схема системы термостабилизации ускоряющей секции прототипа форинжектора ВЭПП-5: 1 - расходомер, 2, 4, 6 - термодатчики, 3 - ТЭНы, 5 - ускоряющая секция, 7, 8, 10 - КАМАК-блоки, 9 - источник питания ТЭНов, 11 - управляющая ЭВМ.

В эксперименте при постоянном расходе воды изменялась ее температура на входе в секцию. Измерялась зависимость от времени температуры воды на входе и выходе секции и ее расхода, рассчитывалась температура воды на выходе при тех же расходе и входной температуре. Проведено несколько серий измерений при разных значениях расхода. На рис. 3 и 4 представлены расчетные и измеренные данные для расхода 0.27 л/с. Отличие измеренных значений с численным расчетом не более 2%.

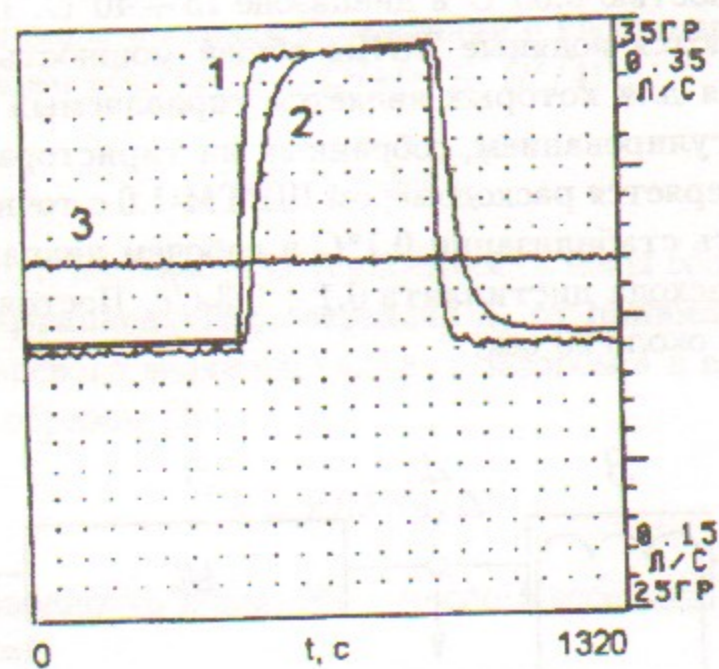


Рис. 3: Экспериментальная зависимость температуры воды на входе (кривая 1) и выходе (кривая 2) ускоряющей секции от времени. Масштаб горизонтальной оси - 60 сек. на клетку.

Таким образом мы можем рассчитать распределение температуры УС и воды по длине секции в любой момент времени при произвольно меняющихся параметрах - расходе воды, ее температуры на входе секции и мощности ВЧ-потерь в секции.

Для определения чувствительности УС к возмущениям температуры входной воды было проведено следующее моделирование: на стационарное состояние без ВЧ-нагрева ($T_{yc}(x, t) = T_p(x, t) = T_0(x, t) = 0$) накладывалось возмущение

$$T_0(0, t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ T_{возм}, & 0 < t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}$$

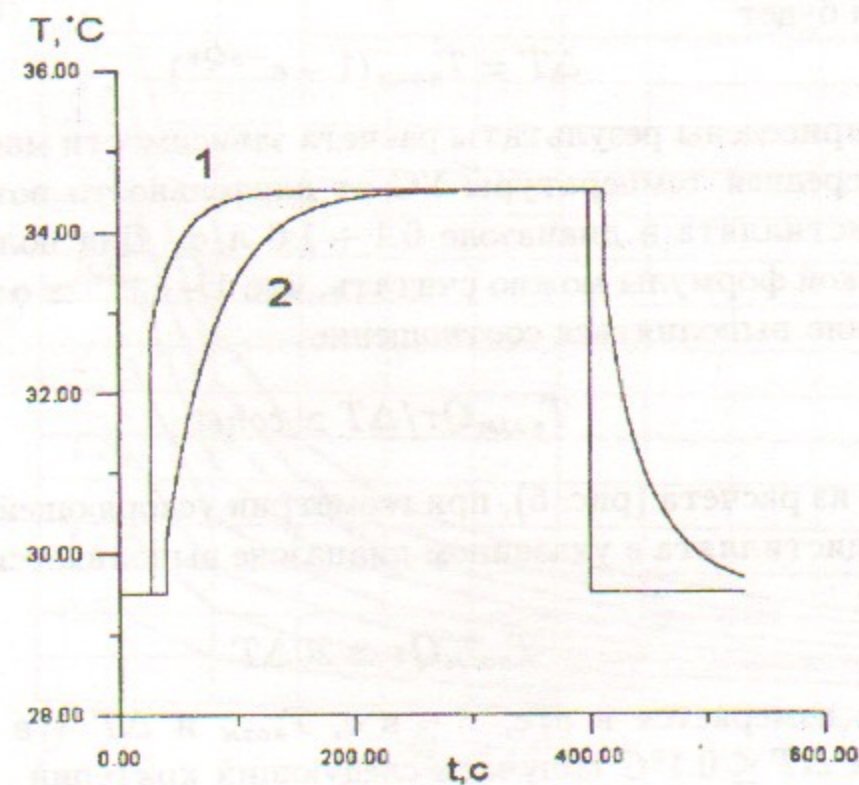


Рис. 4: Расчетная зависимость температуры воды на входе (кривая 1) и выходе (кривая 2) ускоряющей секции от времени.

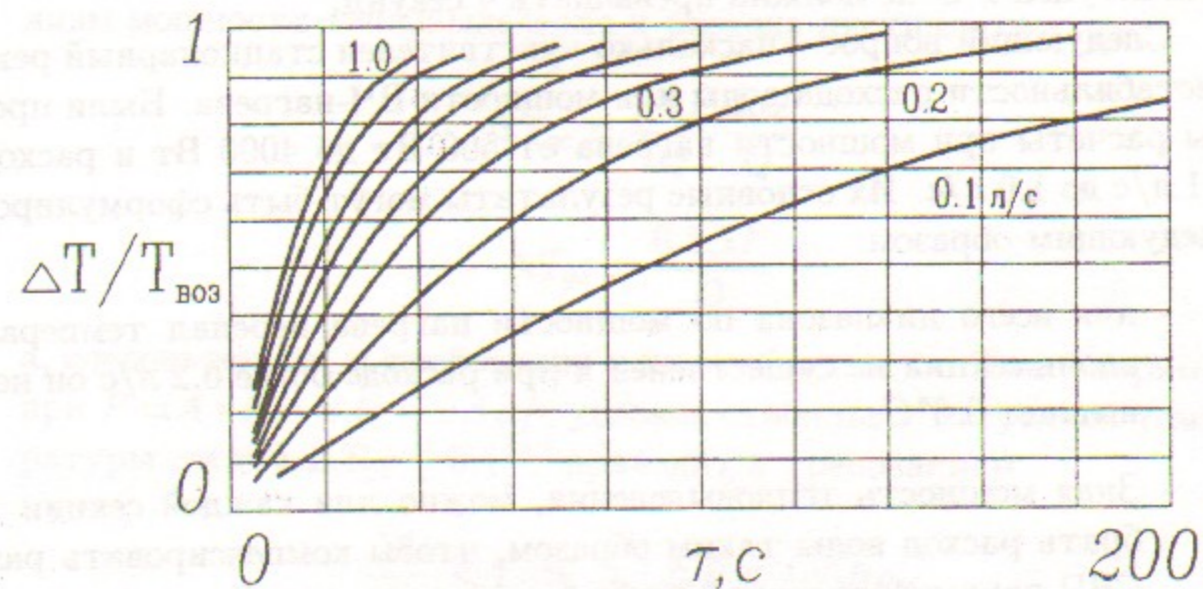


Рис. 5: Зависимость максимального отклонения средней температуры УС от длительности возмущения температуры дистиллята на входе в секцию, нормированная на амплитуду возмущения.

При этом максимальное отклонение средней температуры УС от стационарной будет

$$\Delta T = T_{\text{возм}}(1 - e^{-\alpha Q \tau})$$

На рис. 5 приведены результаты расчета зависимости максимального отклонения средней температуры УС от длительности возмущения τ при расходе дистиллята в диапазоне $0.1 \div 1.0$ л/с. Для получения удобной практической формулы можно считать, что $1 - e^{-\alpha \tau} \approx \alpha \tau$, тогда должно приближенно выполняться соотношение

$$T_{\text{возм}} Q \tau / \Delta T \approx \text{const}$$

Как видно из расчета (рис. 5), при геометрии ускоряющей секции (таб. 1) и расходе дистиллята в указанном диапазоне выполняется следующее соотношение

$$T_{\text{возм}} Q \tau \approx 20 \Delta T$$

где расход измеряется в л/с, τ - в с, $T_{\text{возм}}$ и ΔT - в $^{\circ}\text{C}$. С учетом требования $\Delta T \leq 0.1^{\circ}\text{C}$ получаем следующий критерий

$$T_{\text{возм}} \tau Q \leq 2 \text{ л}^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

Соотношение (12) определяет качество стабилизации температуры дистиллята на входе секции. Так, например, при расходе 0.5 л/с для удержания температуры УС в необходимых пределах длительность возмущения амплитудой 1°C не должна превышать 4 секунд.

Следующий вопрос - насколько чувствителен стационарный режим к нестабильности расхода воды или мощности ВЧ-нагрева. Были проведены расчеты при мощности нагрева от 500 Вт до 4000 Вт и расходе от 0.1 л/с до 1.0 л/с. Их основные результаты могут быть сформулированы следующим образом:

- для всего диапазона по мощности нагрева перепад температуры вдоль секции не существенен и при расходе более 0.2 л/с он не превышает 0.6°C ,
- Зная мощность тепловыделения, можно для каждой секции подобрать расход воды таким образом, чтобы компенсировать разброс СВЧ-параметров секций с помощью рассчитанной зависимости средней температуры секции от расхода воды (рис. 6)
- существует зависимость (см. рис. 6)

$$QT_{yc}/P \approx 0.5[\text{л}^{\circ}\text{C}/\text{кДж}] \quad (13)$$

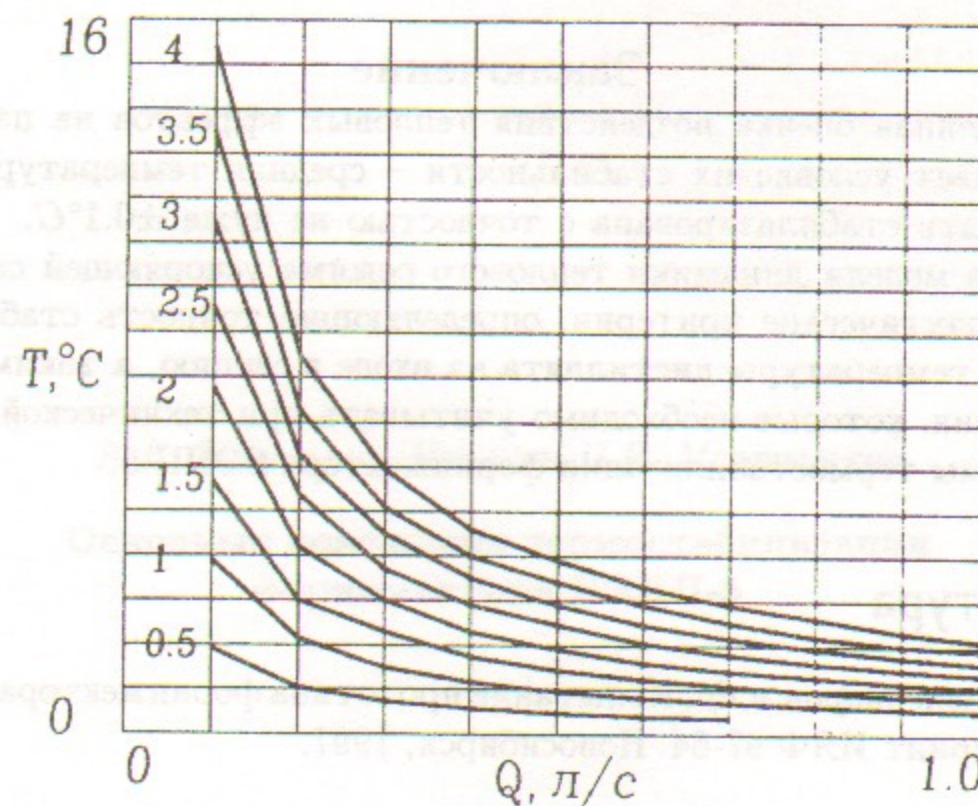


Рис. 6: Зависимость средней температуры УС от расхода дистиллята при различной мощности тепло выделения.

которая позволяет определить чувствительность секции к возмущениям мощности тепловыделения и расхода дистиллята :

$$\Delta T_{yc} = \frac{0.5P}{Q} \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\Delta T_{yc} = \frac{0.5\Delta P}{Q}$$

а, следовательно, и требования к их стабильности. Так, например, при $P = 4 \text{ кВт}$ и $Q = 0.5 \text{ л/с}$ условие стабильности средней температуры секции $\Delta T_{yc} \leq 0.1^{\circ}\text{C}$ приводит к требованиям

$$\frac{\Delta Q}{Q} \leq 2.5\% \text{ и } \Delta P \leq 100 \text{ Вт}$$

Заключение

Проведенная оценка воздействия тепловых эффектов на параметры пучка и дает условие их стабильности – средняя температура секции должна быть стабилизирована с точностью не хуже $\pm 0.1^\circ\text{C}$. На основе анализа модели динамики теплового режима ускоряющей секции получены практические критерии, определяющие точность стабилизации расхода и температуры дистиллята на входе в секцию, а таким образом ограничения, которые необходимо учитывать при технической реализации системы термостабилизации форинжектора ВЭПП-5.

Литература

- [1] *А.В.Александров и др.* Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5. – Препринт ИЯФ 97-64. Новосибирск, 1997.
- [2] *О.А.Вальднер и др.* Справочник по диафрагмированным волноводам. – М., Атомиздат, 1977.
- [3] *С.С.Кутателадзе.* Теплопередача и гидродинамическое сопряжение: Справочное пособие. – М., Энергоатомиздат, 1990.

К.В. Губин А.Г. Иголкин П.В. Мартышкин

Основные положения термостабилизации форинжектора ВЭПП-5

ИЯФ 97-100

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 10.12. 1997 г.

Сдано в набор 15.12.1997 г.

Подписано в печать 22.11.1997 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 80 экз. Бесплатно. Заказ № 100

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.