

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



C345e
B-19

24/10-75
P9 - 9119

А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин,
В.И.Лепилов, А.Ф.Чеснов

4117/2-75

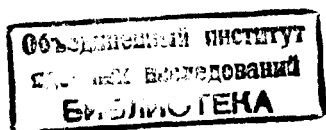
ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВОГО КАНАЛА
ДЛЯ ФАЗОТРОНА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1975

P9 - 9119

А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин,
В.И.Лепилов, А.Ф.Чеснов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВОГО КАНАЛА
ДЛЯ ФАЗОТРОНА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Расчетные параметры железно-токовой секции канала, полученные в работе /1/, проверялись экспериментально на макете в масштабе 1:1. Моделирование проводилось для проверки выбранной схемы охлаждения, определения топографии магнитного поля и выявления возможностей дополнительного шиммирования возмущений от секции в области ускоряемого пучка.

При выборе схемы охлаждения особое внимание уделялось элементам секции с высокой плотностью тока $/j > 50 \text{ А/мм}^2 /$. Одним из таких элементов является септум, где плотность тока достигает величины $j \approx 170 \text{ А/мм}^2$. Такой септум можно охлаждать водой, протекающей по продольным или поперечным каналам /2/. Число каналов должно быть выбрано из условия оптимального охлаждения и получения достаточно равномерного распределения тока по высоте септума, что может обеспечить однородное распределение поля внутри секции для выбранной вертикальной апертуры и уменьшить возмущения основного магнитного поля в области ускоряемого пучка при отходе от средней плоскости.

Расчет распределения тока и температуры по высоте септума железно-токовой секции канала проводился на ЭВМ с использованием программы THERM /3/, с помощью которой решается уравнение теплопроводности вида:

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} + \frac{1}{\lambda} g = 0,$$

где θ - температура проводника, λ - коэффициент теплопроводности проводника, g - количество тепла, выделяемого в элементе проводника с током i .

На рис. 1 приведены результаты расчета для двух конфигураций септума с током $i = 20500$ А и фиксированной температурой концов $\theta/z = 0$ и $z = 5,2$ см/, равной $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка, для септума с постоянной

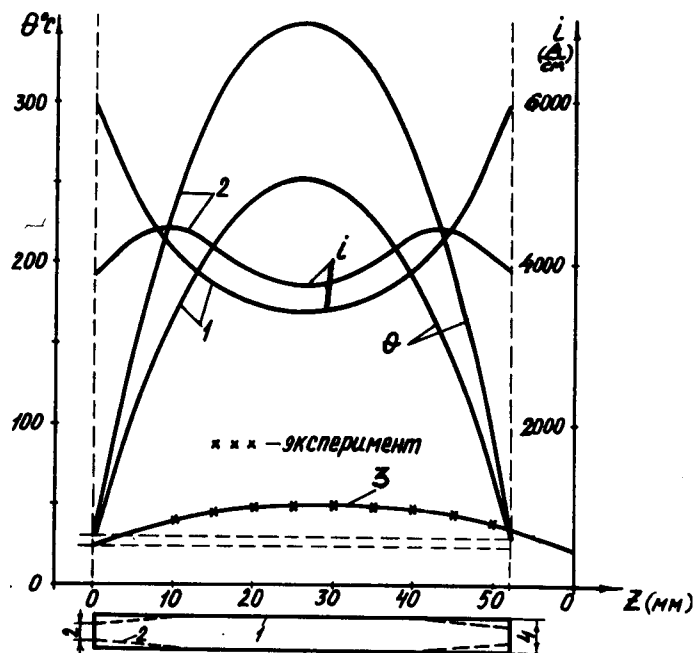


Рис. 1. Распределение тока и температуры по высоте септума постоянного /1/ и переменного /2/ поперечных сечений.

толщиной /кривые 1/ температура его в средней части достигает величины $\theta = 250^\circ\text{C}$, что вызывает концентрацию тока $\approx 40\%$ на его концах. Профилируя септум по высоте, можно получить более равномерное распределение тока /кривые 2/. Однако при этом максимальная температура септума достигает величины $\theta = 350^\circ\text{C}$.

Исходя из этого, выбрали схему охлаждения септума с помощью нескольких продольных каналов, при которой обеспечивается равномерное охлаждение по всему сечению.

Для иллюстрации точности расчетов на этом же рисунке дано сравнение /кривые 3/ расчетного и экспериментально измеренного распределений температуры по высоте медной шины $0,4 \times 0,6$ см при токе $i = 9000$ А и $\theta_0 = 24^\circ\text{C}$.

Общий вид макета железно-токовой секции канала показан на рис. 2, а схема основной обмотки и поперечные сечения входной и выходной части секции - на рис. 3. Основная обмотка состоит из двух независимо охлаждаемых витков, соединенных последовательно по току. Септум состоит из двух пластин, размеры поперечного сечения которых для входной и выходной части секции, соответственно, равны $0,4 \times 2,58$ и $1,0 \times 3,0$ см. Пластина септума набрана из медных трубок прямоугольного сечения размером $40 \times 0,4 \times 0,86$ см для входной части и $43 \times 1,0 \times 1,5$ см для выходной части секции, с толщиной стенки $0,1$ и $0,2$ см соответственно. Трубки каждой части септума сварены друг с другом аргоно-дуговой сваркой и с помощью медных переходов соединены между собой и антисептумом, который выполнен из медных трубок $\phi 1,0 \times 0,2$ см, соединенных между собой аналогичным образом. Корректирующая катушка состоит из двух витков, симметрично расположенных относительно средней плоскости, и выполнена из медной трубки $\phi 1,0 \times 0,2$ см.

Питание основной обмотки осуществлялось от стандартного выпрямителя типа ВАК-12500-12-4 / $I_H = 12500$ А, $U_H = 12$ В/, а корректирующей - от двух машинных генераторов / $I_H = 1000$ А, $U_H = 60$ В/, работающих в параллель.

Следует отметить, что выпрямители типа ВАК характеризуются большой амплитудой пульсаций тока, зависящей от величины нагрузки. При предельных нагрузках эти пульсации составляют величину $\approx 5\%$. Для исключения пульсирования выведенного пучка протонов из ускорителя, как показывают расчеты акцептанса канала, необходимо пульсации в системе питания основной обмотки уменьшить до величины $\approx 0,5\%$.

Результаты испытаний макета железно-токовой секции канала приведены на рис. 4. Как видно из рисунка,

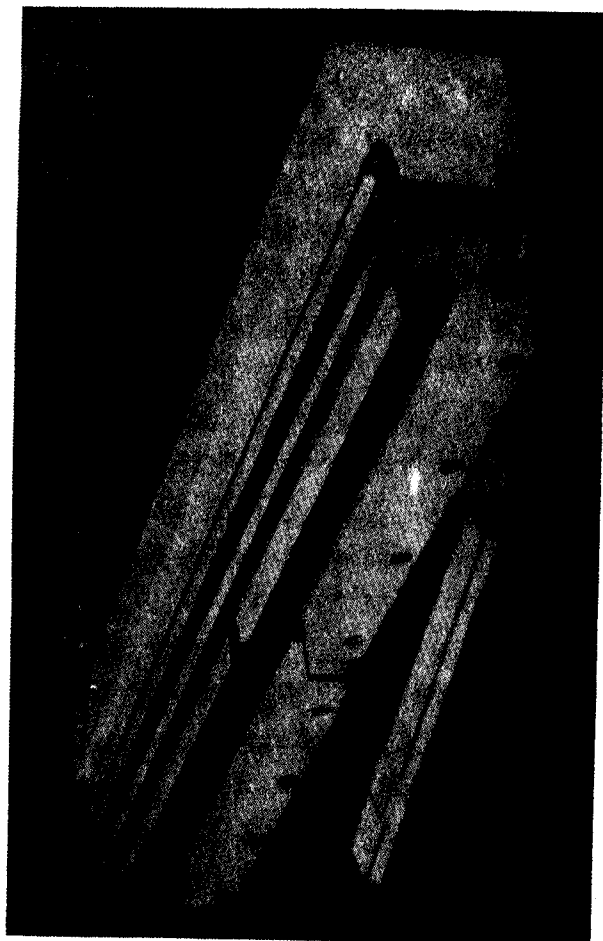


Рис. 2. Макет железно-токовой секции канала.

для расчетного тока $i = 11000$ А температура воды на выходе /точка А рис. 3/ составляет величину $t = 64^\circ\text{C}$, при температуре воды на входе $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ и перепаде давления $\approx 3,0$ кг/см². Ожидаемые потери пучка $\approx 25\%$ на пластинах септума приведут к увеличению перегрева воды на каждой ветви охлаждения на величину $\Delta t \approx 14^\circ\text{C}$, т.е. температура воды на выходе в этих условиях работы канала не должна превышать $\approx 80^\circ\text{C}$. При увеличении перепада давления максимальная температура охлаждающей воды может быть снижена.

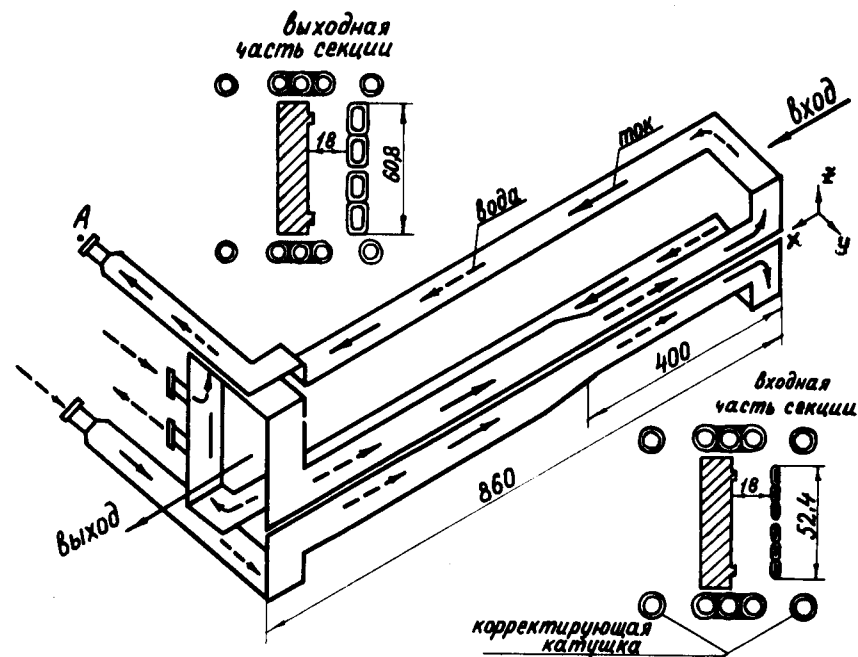


Рис. 3. Схема основной обмотки и поперечные сечения входной и выходной части макета железно-токовой секции канала.

Расчет сил, действующих на элементы макета железно-токовой секции канала, проводился с помощью программы FORCES, в которой сделаны следующие допущения:

1/ объемный токовый проводник конечной длины представляется системой линейных проводников бесконечной длины;

2/ ферромагнитный брусок представляется равномерно намагниченным и заменяется линейными проводниками, расположенными на его боковых поверхностях, при этом суммарный ток вычисляется по формуле /4/

$$NI = 10 \text{ кВМ},$$

где b - высота в см, а M - намагниченность /Э/ ферромагнитного бруска;

3/ элементы канала находятся во внешнем магнитном поле с постоянным градиентом.

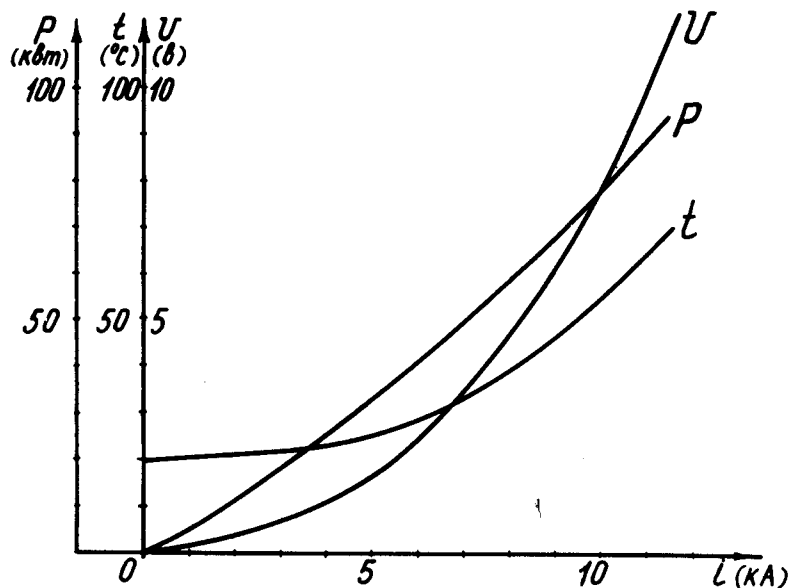


Рис. 4. Падение напряжения, выделяемая мощность и температура охлаждающей воды на выходе в зависимости от тока в основной обмотке канала.

Магнитное поле в месте расположения каждого токового элемента рассчитывается по следующим выражениям:

$$H_x^j = -\sum \frac{I_i}{2\pi} \frac{y_i - y_j}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2};$$

$$H_y^j = \sum \frac{I_i}{2\pi} \frac{x_i - x_j}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

где I_i - токи линейных проводников; x_i, y_i - координаты линейных проводников; H_x^j и H_y^j - компоненты магнитного поля в месте расположения j -го проводника.

Силы, действующие на единицу длины j -го проводника, находятся по формулам:

$$F_x^j = I_j (H_y^j + H_{y0}^j),$$

$$F_y^j = I_j (H_x^j + H_{x0}^j),$$

где H_{x0} и H_{y0} - компоненты внешнего поля в месте расположения j -го элемента.

На рис. 5 показано поперечное сечение входной части канала и расчетные векторы сил для токовых и ферромагнитных элементов. Эти данные получены для внешнего магнитного поля $H_0 = 16400$ Э с градиентом $\frac{dH_0}{dx} =$

$= 170$ Э/см и величинами тока в основной и корректирующей обмотках, соответственно равными 11000 и 3100А. На этом же рисунке приведено не рабочее положение ферромагнитной пластины /пунктир/.

Оценочные расчеты на прочность элементов железно-токовой секции показали:

1/ проводники тонкой части пластины септума в месте крепления ее к основанию должны быть сварены непрерывным швом; при этом, максимальный прогиб септума будет составлять 0,014 мм;

2/ ферромагнитная пластина при погонной нагрузке $q = 12$ кг/см должна быть усилена двумя ребрами жесткости с тем, чтобы не допустить изгиба ее по длине.

Для определения точности выполненных расчетов были проведены эксперименты, в которых методом Брине-

ля измерялись силы, действующие на ферромагнитные пластины во внешнем поле. Сравнение полученных результатов показывает, что точность расчета механических сил для различных конфигураций пластин составляет $10 \pm 30\%$. Измерения магнитного поля макета железно-токовой секции канала проводились в зазоре электромагнита СП-57 / $\phi_n = 115$ см, $2h_3 = 15,4$ см / датчиками Холла

с точностью $\frac{\Delta H_0}{H} \approx 1 \cdot 10^{-2}$ внутри и $\frac{\Delta H_0}{H} \approx 1 \cdot 10^{-3}$ вне

канала. Эксперимент выполнялся при индукции внешнего поля $B_0 = 15000$ Гс, т.е. при значении, близком к величине поля установки "Ф" в зоне вывода.

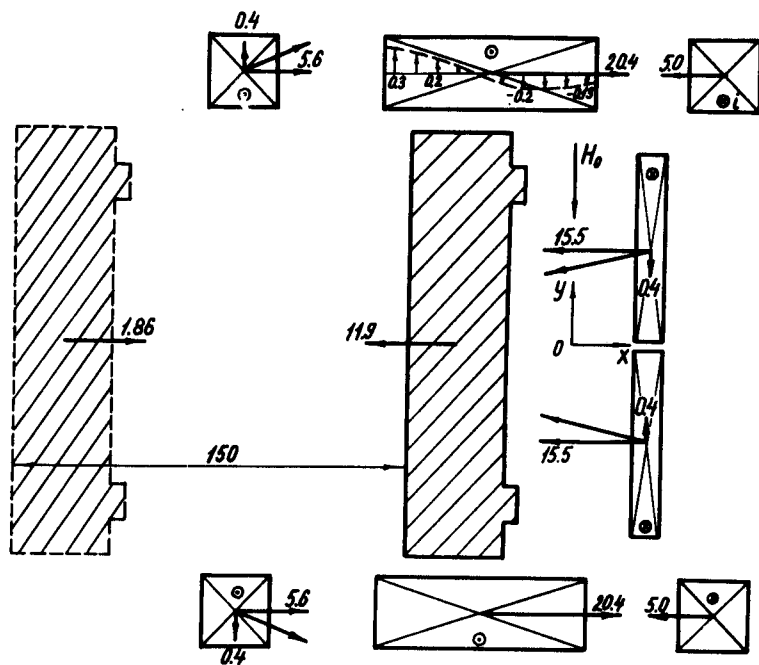


Рис. 5. Распределение усилий на элементах железно-токовой секции канала.

Результаты экспериментального моделирования приведены на рис. 6, 7. Кривые 1 рис. 6 соответствуют выбранным значениям токов в основной и корректирующей обмотках секции /1/ для установки "Ф" / $I = 11000$ А, $I = 3100$ А/. Значительные возмущения поля вблизи септума $\approx 100 \pm 300$ Э/ обусловлены несоответствием зазоров между полюсами в расчете / $2h_3 = 30$ см/ и в эксперименте / $2h_3 = 15,4$ см/. Наилучшие результаты /кривые 2/ по шиммированию возмущений поля, вносимого каналом, получены при значениях тока в обмотках $I = 8500$ А и $I = 2000$ А, выбранных расчетным способом.

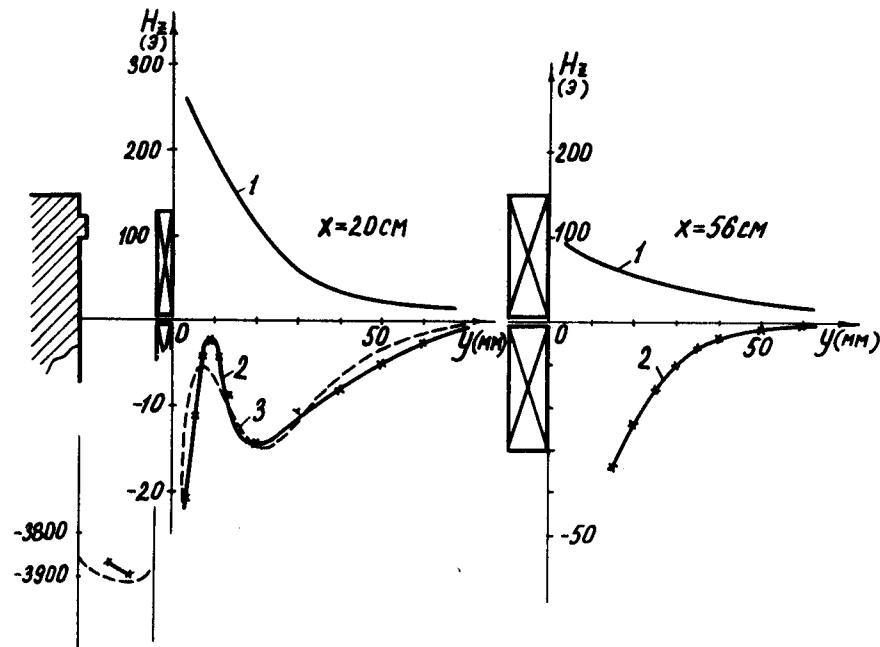


Рис. 6. Распределение поля для средних сечений входной и выходной части макета секции канала.

Видно, что величины неотшуммированного поля и его градиента в области циркулирующего пучка соответственно равны $\Delta H \approx 20$ Э и $\frac{d\Delta H}{dy} \approx 30$ Э/см / $y = 0,3$ см/

для входной части и $\Delta H \approx 25$ Э, $\frac{d\Delta H}{dy} \approx 10$ Э/см / у =
 = 2,0 см/ для выходной части сечения. Кривые 3 характеризуют расчетное распределение поля для выбранных токов.

Распределение магнитного поля в области шиммирования вдоль длины железно-токовой секции приведено на рис. 7. При расположении ферромагнитной пластины, как показано на схеме, на входе в секцию наблюдается отрицательный выброс поля величиной ≈ 600 Э и протяженностью 14 см / кривая 1/. С удалением от септума величины отрицательного выброса поля и его градиента уменьшаются и на расстоянии $y = 9$ см, $\Delta H \approx 0$ и $\frac{d\Delta H}{dy} \approx 0$.

Оценка возмущений поля, вносимых каналами, сделанная в работе /5/, показала их незначительное влияние на процесс раскачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты исследования макета железно-токовой секции канала, а именно:

1/ выбрана схема охлаждения, которая позволяет применить относительно простую технологию изготовления токовых элементов секции;

2/ показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных распределений магнитных полей от канала;

3/ исследована возможность исправления возмущений магнитного поля путем перераспределения токов в основной и корректирующей обмотках;

4/ выполнен расчет усилий на элементы железно-токового канала;

5/ определены технические и эксплуатационные характеристики секции.

В заключение авторы благодарят Ф.Е.Гугнина, В.В.Ахманова за настройку системы питания, Е.В.Самсонова за помощь в проведении расчетов на ЭВМ.

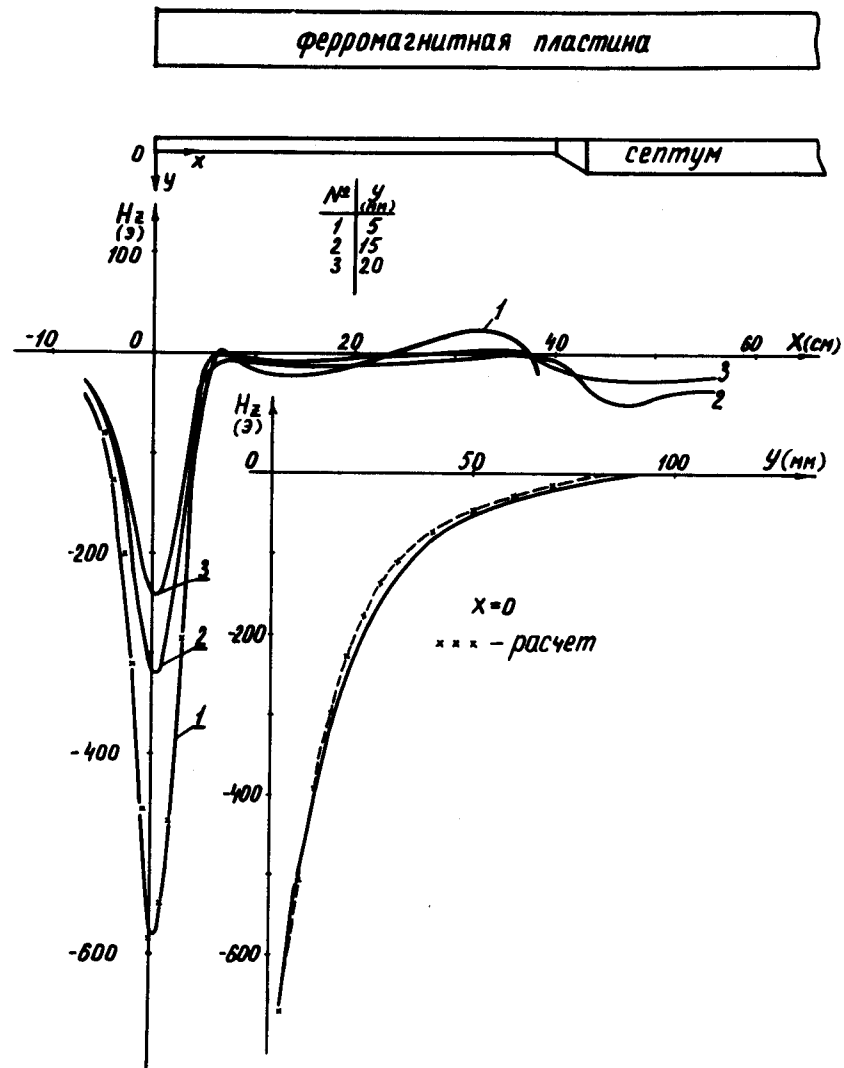


Рис. 7. Распределение магнитного поля в области шиммирования вдоль длины железно-токовой секции канала.

Литература

1. Н.Л.Заплашин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, Р9-9023, Дубна, 1975.
2. R.L.Keizer. Dipole Septum Magnets. CERN, 74-13, Geneva, 1974.
3. R.Cohen, E.Martin, K.Ziegler. IEEE Trans. on Nucl. Science., NS-18, No. 3, p. 326, 1971.
4. В.И.Данилов, М.Ианович. ОИЯИ, Р9-3542, Дубна, 1967.
5. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплашин, В.В.Кольга, ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.

— Рукопись поступила в издательский отдел
7 августа 1975 года.