

6  
A-60

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР  
Объединенный Совет отделений физических и  
технических наук

ЛАШИН ВЛАДИМИР КОНСТАНТИНОВИЧ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПАЗОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ  
НАСЫЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

(05.09.01 - электрические машины)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рига - 1974

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР  
Объединенный Совет отделения физических и  
технических наук

ЛАПШИН ВЛАДИМИР КОНСТАНТИНОВИЧ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПАЗОВЫХ ПРОСТРАНСТВАХ  
НАСЫЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

(05.09.01 - электрические машины)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рига - 1974



Работа выполнена в Физико-энергетическом институте Академии наук Латвийской ССР.

Научный руководитель чл.-корр. АН Латв.ССР, доктор технических наук, профессор В.В.АПСИТ.

Официальные оппоненты:

чл.-корр. АН Латв.ССР, доктор технических наук Я.Я.ЛИЕЛПЕТЕР

кандидат технических наук Я.П.ЗВИЕДРИС

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский институт ЛЭО Электросила.

Автореферат разослан " ... " ..... 1974 г.

Защита диссертации состоится в " ... " ..... 1974 г. на заседании Объединенного Совета Отделения физико-технических наук АН Латвийской ССР (г.Рига, ГСН, ул. Тургенева, 19).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке АН Латвийской ССР (г.Рига, ул. Коммунальная, 4).

Ученый секретарь  
Объединенного Совета

/М.П.ЗАКИС/

Технический прогресс в электромашиностроении неразрывно связан с совершенствованием и развитием методов расчета, без которых невозможно создание машин с высокими технико-экономическими показателями. Одним из важных этапов в процессе создания электрических машин является ее электромагнитный расчет, дающий основную информацию для проектирования машин.

Активные материалы современных электрических машин имеют такие электромагнитные нагрузки, при которых фактор насыщения, обусловленный нелинейными свойствами ферромагнитных сред, играет существенную роль в предопределении характеристик и параметров машин.

Первоначально проблема учета насыщения решалась чаще всего на основе предположений и ряда довольно грубых допущений. Учет насыщения сводился к определению поправочных коэффициентов насыщения или непосредственно параметров машины с помощью одной или нескольких характеристик машины или ее магнитной цепи (характеристик холостого хода и короткого замыкания, кривых намагничивания статора и ротора и т.п.). Однако созданные на этой упрощенной основе методы расчета машин могут применяться лишь для определенных режимов и конкретных типов машин.

Поэтому в последнее время, учитывая возможности использования быстродействующих вычислительных машин, наметились пути решения задачи учета насыщения на основе точного расчета магнитного поля во всем объеме машины (работы Л.Г.Лернера, Р.В.Оганяна, В.В.Апсита, А.В.Иванова-Смоленского и В.А.Кузнецова, Е.Л.Ердели и др., В.Крейзингера, И.Адама, Р.В.Фильца и Л.И.Глухивского, Л.В.Смирнова и других). Трудности определения магнитного поля машины с учетом всех образующих его факторов привели к тому, что основные исследования были выполнены для машин с достаточно большим числом пазов на полюс и фазу, т.е. когда правомерна замена реального зубчатого якоря идеализированным гладким.

Что касается тех случаев расчета и анализа магнитно-



го поля в машинах, когда необходимо считаться с реальной структурой зубчатого якоря и распределенными в его пазовых пространствах токами, то проведенные исследования далеко не исчерпывают всех связанных с этой задачей вопросов. В частности, является существенным вопрос исследования магнитного поля в пазовых областях насыщенных электрических машин не только с точки зрения предопределения параметров и характеристик, относящихся к полю пазового рассеяния, но, главным образом, для точного расчета результирующего магнитного поля как зубчатого якоря, так и всей машины в целом. Это обусловлено тем, что образующиеся в сложных условиях одновременного воздействия токов в пазах и падений н.с. вдоль окружающих паз насыщенных ферромагнитных элементов пазовые поля изменяют величины потоков, проходящих через ферромагнетики, и соответственно изменяют состояние насыщения последних.

Однако исследование пазовых полей проводилось с целью расчета индуктивных сопротивлений рассеяния и не принимался во внимание фактор влияния этих полей на магнитное состояние ферромагнитных элементов зубчатого якоря. Принятые в этих исследованиях допущения относительно магнитной проницаемости окружающей паз ферромагнитной среды  $\mu = \infty$  или  $\mu = const$  далеко не соответствуют реальному, изменяющемуся по всему объему магнитопровода магнитному состоянию ферромагнетика и поэтому не позволяют использовать полученные результаты для расчета магнитного поля насыщенной электрической машины. Кроме того, в этих исследованиях поля рассеяния рассматривались только для частных случаев геометрии паза и расположенных в нем проводников с токами.

Вышесказанное позволяет заключить, что строгое и полное исследование магнитного поля в пазовых пространствах, окруженных насыщенными ферромагнитными элементами, а также анализ пазовых полей и учет последних при расчете магнитной цепи электрической машины, представляет собой актуальную задачу. Исследование магнитного поля в пазовых пространствах электрических машин в установившихся

режимах и решение ряда вопросов, связанных с использованием полученных результатов является основной целью диссертационной работы.

В первой главе диссертации дана постановка общей краевой задачи расчета поля в пазах и выбран метод ее решения, приведены допущения, получено решение задачи в общем виде, а также рассмотрен вопрос расчета потокосцепления обмотки якоря с реально распределенным в пазах магнитным полем.

Расчет и исследование магнитного поля в пазах электрической машины в установившихся режимах сводится к задаче исследования квазистационарного магнитного поля при заданных токах, распределенных по объему паза. Если иметь в виду дальнейшую цель, а именно, расчет магнитного поля зубчатого якоря с учетом пазовых потоков, то при постановке задачи необходимо предусмотреть возможность использования решений для области пазов для расчета ферромагнитных элементов якоря. Это осуществляется посредством раздельного расчета магнитного поля в пазовых пространствах и ферромагнитных элементах машины и дальнейшим их припасовыванием путем достижения равенства пограничных условий на поверхностях раздела этих сред. Равенство пограничных условий, как известно, сводится к требованию непрерывности на границах нормальной составляющей вектора индукции и касательной составляющей вектора напряженности:

$$B_{n1} = B_{n2}, \quad H_{\tau 1} = H_{\tau 2} \quad (I)$$

Ввиду того, что граничные условия заранее не известны и определяются после припасовывания решений для пазовых областей и ферромагнитных элементов якоря, то магнитное поле в пазовых пространствах необходимо исследовать в общем виде, т.е. при произвольных граничных условиях.

Ограничимся рассмотрением основного плоскопараллельного поля машины и будем считать области пазов линейно-



магнитными средами с магнитной проницаемостью, равной магнитной проницаемости воздуха  $\mu_0$ . Тогда, учитывая, что основные области применяемых в практике пазов, в которых расположены проводники с током, по форме весьма близки к прямоугольнику или кольцевому сектору, задача исследования магнитного поля в пазовых пространствах сводится к решению краевых задач математической физики для линейно-магнитных канонических областей в виде прямоугольника и кольцевого сектора, имеющих на границах произвольные краевые условия в виде касательной составляющей вектора напряженности, а внутри областей - токи, распределенные по конечным сечениям проводников обмотки.

Эти задачи решаются хорошо разработанным методом собственных функций, который позволяет достаточно просто определить в аналитическом виде составляющие поля во всей исследуемой области, включая ее границы.

Решение задачи расчета поля в пазу представлено в виде двух вариантов, каждый из которых может быть использован в зависимости от конкретных условий. Один из них является более общим и решение в нем доведено до определения произвольных постоянных. Второй вариант получен с учетом конкретных краевых условий на шлицевой границе и дне паза.

Для прямоугольного паза оба варианта решения в соответствии с рис. 1а могут быть записаны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} B_x(x, y) &= \frac{1}{2} B_{x0}(y) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{xn}(y) \cos(\alpha_n x), \\ B_y(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} B_{yn}(y) \sin(\alpha_n x), \end{aligned} \right\} (2)$$

где

1) для первого варианта

$$B_{x0}(y) = C_{10} - \mu_0 \int F_0(y) dy, \quad (3)$$

$$B_{xn}(y) = C_{1n} e^{\alpha_n y} - C_{2n} e^{-\alpha_n y} - \frac{1}{2} \mu_0 [\varphi_n(y) + \psi_n(y)], \quad (4)$$

$$B_{yn}(y) = C_{1n} e^{\alpha_n y} + C_{2n} e^{-\alpha_n y} + \frac{1}{2} \mu_0 [\varphi_n(y) - \psi_n(y)], \quad (5)$$

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{a}, \quad (6)$$

$$\varphi_n(y) = e^{-\alpha_n y} \int e^{\alpha_n y} F_n(y) dy, \quad (7)$$

$$\psi_n(y) = e^{\alpha_n y} \int e^{-\alpha_n y} F_n(y) dy, \quad (8)$$

$$F_n(y) = J_n(y) + \frac{2}{a} [H_{y1}(y) - H_{y2}(y) \cos(n\pi x)], \quad (9)$$

$$J_n(y) = \frac{2}{a} \int_0^a j_z(x, y) \cos(\alpha_n x) dx. \quad (10)$$

Коэффициенты  $C_{10}$ ,  $C_{1n}$  и  $C_{2n}$  имеют смысл произвольных постоянных, значения которых находятся в результате учета граничных условий на шлицевой ( $y=0$ ) и донной ( $y=h$ ) границах рассматриваемого паза.

2) для второго варианта

$$B_{x0}(y) = \mu_0 [H_{x20} - V(y)], \quad (11)$$

$$B_{xn}(y) = \mu_0 [H_{x1n} f_{1n}(y) + H_{x2n} f_{2n}(y) - T_n(y)], \quad (12)$$

$$B_{yn}(y) = \mu_0 [-H_{x1n} g_{1n}(y) + H_{x2n} g_{2n}(y) + S_n(y)], \quad (13)$$

$$V(y) = \int_h^y F_0(y) dy, \quad (14)$$



$$H_{x1n} = \frac{2}{a} \int_0^a H_{x1}(x) \cos(\alpha_n x) dx, \quad H_{x2n} = \frac{2}{a} \int_0^a H_{x2}(x) \cos(\alpha_n x) dx, \quad (15)$$

$$f_{1n}(y) = \frac{\sinh[\alpha_n(h-y)]}{\sinh(\alpha_n h)}, \quad f_{2n}(y) = \frac{\sinh(\alpha_n y)}{\sinh(\alpha_n h)}, \quad (16)$$

$$g_{1n}(y) = \frac{c \cosh[\alpha_n(h-y)]}{\sinh(\alpha_n h)}, \quad g_{2n}(y) = \frac{c \cosh(\alpha_n y)}{\sinh(\alpha_n h)}, \quad (17)$$

$$T_n(y) = \frac{1}{2} [\Psi_n(h) + \Psi_n(h)] f_{2n}(y) - \frac{1}{2} [\Psi_n(0) + \Psi_n(0)] f_{1n}(y) + \frac{1}{2} [\Psi_n(y) + \Psi_n(y)], \quad (18)$$

$$S_n(y) = \frac{1}{2} [\Psi_n(h) + \Psi_n(h)] g_{2n}(y) - \frac{1}{2} [\Psi_n(0) + \Psi_n(0)] g_{1n}(y) + \frac{1}{2} [\Psi_n(y) - \Psi_n(y)]. \quad (19)$$

Решение задачи расчета поля в трапецидальном пазу имеет аналогичный вид.

Так как заполняющая паз среда является линейно-магнитной, то вполне естественно, что конечный результат был получен в линейной зависимости от всех заданных функций, характеризующих распределение тока внутри паза и касательных составляющих напряженности поля на его границах (рис. I). В этой связи решение целесообразно представить в виде удобных для расчетов и анализа пяти взаимно независимых слагаемых:

а) для прямоугольного паза

$$\left. \begin{aligned} B_x(x, y) &= B_x^{(j)}(x, y) + B_x^{(y1)}(x, y) + B_x^{(y2)}(x, y) + B_x^{(x1)}(x, y) + B_x^{(x2)}(x, y), \\ B_y(x, y) &= B_y^{(j)}(x, y) + B_y^{(y1)}(x, y) + B_y^{(y2)}(x, y) + B_y^{(x1)}(x, y) + B_y^{(x2)}(x, y); \end{aligned} \right\} (20)$$

б) для трапецидального паза

$$\left. \begin{aligned} B_\vartheta(\vartheta, r) &= B_\vartheta^{(j)}(\vartheta, r) + B_\vartheta^{(r1)}(\vartheta, r) + B_\vartheta^{(r2)}(\vartheta, r) + B_\vartheta^{(\vartheta1)}(\vartheta, r) + B_\vartheta^{(\vartheta2)}(\vartheta, r), \\ B_r(\vartheta, r) &= B_r^{(j)}(\vartheta, r) + B_r^{(r1)}(\vartheta, r) + B_r^{(r2)}(\vartheta, r) + B_r^{(\vartheta1)}(\vartheta, r) + B_r^{(\vartheta2)}(\vartheta, r). \end{aligned} \right\} (21)$$

В этих выражениях первое слагаемое - с верхним индексом (j) - определяется только функцией распределения плотности тока в пазу  $j_z(x, y)$  или  $j_z(\vartheta, r)$  и характеризует поле в пазу, создаваемое токами внутри него при нулевых граничных условиях. По физическим условиям это поле точно совпадает с общепринятым в литературе полем пазового рассеяния. Второе и третье слагаемые - с верхними индексами (y1), (y2) или (r1), (r2) - определяются только функциями граничных условий на боковых сторонах паза  $H_{y1}(y)$ ,  $H_{y2}(y)$  или  $H_{r1}(r)$ ,  $H_{r2}(r)$  и характеризуют поле в пазу, обусловленное действием падения н.с. вдоль прилегающих к пазу ферромагнитных зубцов. Такого рода поля будем называть пазовыми полями ферромагнитного влияния зубцов. Четвертое и пятое слагаемые - с верхними индексами (x1), (x2) или (ϑ1), (ϑ2) - определяются только функциями граничных условий на нижней и верхней сторонах пазовых областей  $H_{x1}(x)$ ,  $H_{x2}(x)$  или  $H_{\vartheta1}(\vartheta)$ ,  $H_{\vartheta2}(\vartheta)$ . Верхняя (донная) сторона граничит со спинкой якоря, и поэтому соответствующая ей функция граничного условия характеризует падение н.с. вдоль спинки, прилегающей ко дну паза, а вызываемое этим падением н.с. поле в пазу назовем пазовым полем ферромагнитного влияния спинки якоря. Соответствующая нижней (шлицевой) стороне паза функция граничного условия характеризует особенности воздействия шлицевой области, и поэтому вызываемое этим воздействием поле в пазу может быть названо пазовым полем шлицевого влияния.

Пазовые поля в общем случае распределены по пазовому пространству достаточно сложным образом и использование основанных на упрощенном представлении этих



полей известных формул для определения потокоцепления обмотки якоря с пазовыми полями может внести существенные ошибки в расчеты потокоцеплений. Поэтому на основе анализа потоков, сцепляющихся с витками секции, были получены в общем виде формулы для определения потокоцепления многовитковых секций с магнитным полем, имеющим произвольный характер распределения в пазовом пространстве.

Во второй главе диссертации проведено исследование пазового поля рассеяния и соответствующих ему коэффициентов полей само- и взаимной индукции рассеяния в пазах прямоугольной и трапецидальной формы при произвольном расположении в них токовых зон.

Ввиду того, что токовые зоны в пазу расположены дискретно, то для практического использования первого варианта решения задачи расчета поля в пазу, полученного в первой главе, область паза подразделялась на участки таким образом, чтобы в пределах каждого из них распределение тока в направлении осей  $y$  или  $r$  оказалось бы непрерывным (участки 1, 2 и 3 на рис. 2).

Используя условия равенства на границах участков касательных и нормальных составляющих вектора индукции и краевые условия, относящиеся к горизонтальным границам паза, были получены аналитические выражения для расчета составляющих вектора индукции поля рассеяния. Это, в свою очередь, позволило на базе выражений для определения потокоцепления многовитковых секций, приведенных в первой главе, получить формулы для расчета коэффициентов полей само- и взаимной индукции рассеяния, учитывающие реальный характер распределения поля и произвольное положение секций обмоток якоря в пазовом пространстве.

В результате расчета составляющих пазового поля рассеяния было установлено, что как для зубцовых обмоток, так и для якорных обмоток обычного исполнения, рас-

положенных в пазах, относительная высота которых (в прямоугольном пазу  $\mathcal{K} = \frac{h}{a}$ ; в трапецидальном пазу  $\mathcal{K}_0 = \frac{h}{a_0}$ , где  $a_0$  - средняя ширина паза, равная  $1/2 (r_1 + r_2)$ ) больше двух, общепринятое представление о поле рассеяния с достаточной точностью соответствует действительности. Для полей рассеяния обмоток якоря, расположенных в неглубоких пазах ( $\mathcal{K} = \mathcal{K}_0 \leq 2$ ) и имеющих толстую боковую пазовую изоляцию, общепринятое допущение о параллельности магнитных силовых линий поля рассеяния недостаточно верно.

В качестве примера на рис. 3, 4 приведены относительные составляющие поля рассеяния ( $\beta = \frac{B_x^{(j)}(x^*, y^*)}{\mu_0 I/a}$  и  $\gamma = \frac{B_y^{(j)}(x^*, y^*)}{\mu_0 I/a}$ , где  $x^* = \frac{x}{a}$ ,  $y^* = \frac{y}{h}$ ,  $I$  - полный ток паза) в прямоугольном пазу с  $\mathcal{K} = 1$ , в котором секция обмотки занимает только правую половину паза (т.н. зубцовая обмотка) и имеет пазовую изоляцию толщиной в 10% от ширины паза. Из этих рисунков видно, что в данном случае поперечная составляющая поля рассеяния распределяется по ширине паза несимметрично и кроме нее имеет место продольная составляющая, вполне соизмеримая с поперечной, тогда как обычно продольная составляющая поля рассеяния принимается равной нулю, а поперечная представляется не изменяющейся по ширине паза (пунктирная кривая на рис. 3).

Расчет коэффициентов полей само- и взаимной индукции рассеяния показал, что определение этих коэффициентов на основании упрощенного представления поля рассеяния дает достаточно точные результаты для большинства встречающихся на практике вариантов геометрии пазов и расположенных в них токовых зон. Однако при расчете коэффициентов в случае неглубоких пазов ( $\mathcal{K} = \mathcal{K}_0 \leq 2$ ) необходим учет реальной, а не упрощенной картины поля рассеяния.



В третьей главе диссертации проведены исследования поля шлицевого влияния, обусловленного воздействием шлицевой области, и полей ферромагнитного влияния зубцов и спинки якоря, обусловленных действием падения н.с. вдоль прилегающих к пазу элементов магнитной цепи машины. Исследование этих магнитных полей до сих пор практически не проводилось и представляет как теоретический, так и практический интерес. Поэтому результаты расчета составляющих полей и их коэффициентов потокосцеплений с секциями обмотки якоря приведены для разного характера падения н.с. вдоль прилегающих к пазу ферромагнетиков и различных вариантов геометрии пазового пространства.

В первой главе при решении общей краевой задачи магнитного поля в пазу граничные условия на сторонах паза были заданы в виде произвольных функций, не накладывающих каких-либо ограничений на характер распределения н.с. вдоль прилегающих к пазу ферромагнитных элементов и шлицевой области. Это обстоятельство позволяет решение краевой задачи (а именно, его второй вариант) непосредственно использовать для определения пазовых полей шлицевого влияния и ферромагнитного влияния зубцов и спинки якоря.

С целью конкретизации заданных в виде произвольных функций граничных условий на сторонах паза было принято, что практически без уменьшения общности граничные условия на верхней и нижней сторонах паза могут быть описаны косинусными рядами Фурье по координате  $x$  или  $\vartheta$ , а на боковых сторонах паза — полиномами следующего вида:

для прямоугольного паза

$$\left. \begin{aligned} H_{y1}(y) &= \sum_{k=0}^m H_{y1k} \left(\frac{y}{b}\right)^k, \\ H_{y2}(y) &= \sum_{k=0}^m H_{y2k} \left(\frac{y}{b}\right)^k; \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

для трапециевидального паза

$$\left. \begin{aligned} H_{r1}(r) &= \sum_{k=0}^m H_{r1k} \left(\frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right)^k, \\ H_{r2}(r) &= \sum_{k=0}^m H_{r2k} \left(\frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right)^k, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где  $H_{r1k}$  и  $H_{r2k}$  — коэффициенты полиномов, имеющие размерность напряженности магнитного поля.

Для принятых функций, описывающих граничные условия, были получены аналитические формулы для расчета составляющих вектора индукции и коэффициентов потокосцеплений полей шлицевого влияния и ферромагнитного влияния зубцов и спинки якоря.

Расчет рассматриваемых слагаемых пазового поля показал, что поля ферромагнитного влияния зубцов якоря являются преобладающими. Интенсивность этих полей сопоставима с полями пазового рассеяния и достигает величин 0,3-0,4 тл. В качестве примера на рис. 5, 6 дано распределение относительных поперечной и продольной составляющих индукции поля ферромагнитного влияния зуба якоря ( $\beta_0 = \frac{B_{r0}^{(r)}(\vartheta, r)}{\mu_0 H_{z10}}$

и  $\beta_0 = \frac{B_{\vartheta 0}^{(\vartheta)}(\vartheta, r)}{\mu_0 H_{z10}}$ , где  $\vartheta = \frac{\vartheta}{\theta}$ ,  $r = \frac{r-r_1}{r_2-r_1}$ ;  $H_{z10}$  —

напряженность магнитного поля в основании зуба) в трапециевидальном пазу и обусловленных проходящим по зубцу равномерным потоком (член полинома бокового граничного условия  $k = 0$ ). Из этих кривых видно, что продольная составляющая напряженности поля в пазу соизмерима с величиной напряженности поля в зубце, а поперечная составляющая может превышать ее во много раз. Последнее обстоятельство имеет важное значение для расчета магнитной цепи, однако до сих пор не принималось во внимание.

Поле шлицевого влияния, в отличие от полей ферромагнитного влияния зубцов, не проникает вглубь пазового



т, обостривая и сосредоточено вблизи шлицевой граници. Поле ферромагнитного влияния спинки якоря в большей части паза определяется постоянной составляющей граничного условия на дне паза, так как влияние гармоник сказывается на пазовом поле только вблизи этой граници. Постоянная составляющая граничного условия на дне паза создает только поперечный поток, интенсивность которого в прямоугольном пазу постоянна и равна напряженности магнитного поля в прилегающем к пазу участке спинки якоря  $H_c$ . В трапециевидном пазу интенсивность поперечного потока возрастает от величины  $H_c$  в направлении шлицевой части паза пропорционально  $1/r$ .

В связи с тем, что слабые пазовые поля создают потекосцепление с секциями обмотки якоря, то для учета этого фактора были предложены расчетные формулы безразмерных коэффициентов потекосцепления этих полей с секцией обмотки якоря при произвольном ее расположении в пазу.

На основе анализа полученных аналитических выражений для коэффициентов потекосцеплений было установлено, что они для обмоток обочного исполнения зависят от двух параметров в прямоугольном пазу и трех - в трапециевидном. Это позволило представить коэффициенты в виде графических зависимостей удобных для практического использования в широком диапазоне изменения параметров паза.

Расчеты коэффициентов показали, что секции обмоток якоря имеют наибольшее потекосцепление с полями ферромагнитного влияния зубцов якоря и полем, обусловленным постоянной составляющей краевого условия на дне паза. Потекосцепление секции с полем шлицевого влияния значительно меньше, а с полем, обусловленным гармониками краевого условия на границе паза и спинки якоря - пренебрежимо мало.

В четвертой главе диссертации рассмотрен вопрос практического использования результа-

тов исследования пазовых полей для расчета магнитной цепи активной зоны машины в целом с учетом влияния пазовых потоков на степень насыщения ее ферромагнитных элементов (спинка и зубцы якоря).

Расчет магнитной цепи активной зоны машины с учетом пазовых потоков базируется на принасовывании решений задач расчета магнитного поля в пазовых и ферромагнитных областях машины по пограничным условиям (1) на поверхностях раздела между ними. Для выполнения этих условий на всех границах пазовых пространств зубцовой зоны разработана схема итерационного процесса (рис. 7), построенная на поэтапном расчете потоков зубцов якоря, исходя из результирующей м.д.с., действующей в активной зоне машины. При этом для определения падений м.д.с. в зубцах использовался общепринятый "метод сечений", базирующийся на допущении, что поток по поперечному сечению зуба распределяется равномерно. Этот метод сводит определение поля в ферромагнитных элементах к расчету магнитной цепи, что дает значительное упрощение и не вносит существенных погрешностей в конечный результат.

Исходя из условий непрерывности потока в каждом элементе зуба, образуемом двумя соседними поперечными сечениями, были составлены уравнения связи потоков в сечениях зуба и пазовых потоков. Совместное решение этих уравнений позволяет определить распределение потоков по зубцу якоря с учетом пазовых полей.

На примере простейшего случая якоря с т.н. зубцовой обмоткой дана оценка влияния пазовых полей на степень насыщения зубцов и в конечном счете на расчет потоков зубцов и потекосцепления секций. Было показано, что при определении потоков и потекосцеплений по заданной величине н.с.  $F_{\Sigma}$ , приложенной между поверхностью полюса и осевым нисом зуба на границе со спинкой якоря, пренебрежение пазовыми потоками или грубый их учет приводит к ошибкам, достигающим 20%.



В качестве примера сплошными линиями на рис.8 и 9 приведены результаты расчета переходных характеристик зубца (рис.8) и зависимости потокосцепления секции зубцовой обмотки якоря  $\Psi_c$  от величины н.с.  $F_{\delta 2}$  (рис.9) с учетом влияния полей рассеяния на степень насыщения зубца. Результаты даны для различных плотностей тока в проводниках секций  $j_c$ , причем, группа кривых А соответствует такому направлению тока в секции, когда потоки рассеяния действуют согласно с основным потоком зубца и подмагничивают его, а группа кривых В - направлению тока в секции, когда потоки рассеяния действуют против основного потока зубца и размагничивают его. Для сравнения на рис.8 и 9 пунктирными линиями изображены соответствующие характеристики без учета вытеснения потока из зубца в наз. а штрих-пунктирными линиями - с приближенным учетом этого вытеснения с помощью зубцового коэффициента  $K_2$ .

Результаты, приведенные на рис.8,9, показывают, что с ростом величин  $F_{\delta 2}$ , а, значит, и основного потока в зубцах, влияние пазовых полей на потоки зубцов и соответственно на потокосцепление секций оказывается значительным и начинает сказываться при индукциях в зазоре  $B_{\delta}$  больших 0,5 тл.

По разработанной в четвертой главе схеме итерационного расчета зубцов якоря машины приведен полный алгоритм определения магнитного поля в насыщенной активной зоне синхронной явнополюсной машины, учитывающий влияние пазовых потоков на степень насыщения ферромагнитных элементов якоря. Проведенный поверочный расчет распределения магнитного поля в активной зоне синхронной явнополюсной машины и сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований на специально сконструированной и построенной электромашинной модели показали, что предложенный метод расчета машины с учетом влияния пазовых потоков на степень насыщения ферромагнитных элементов якоря позволяет с достаточно высокой точностью

определить распределение потоков в насыщенной зубцовой зоне машины при малых затратах машинного времени ЭЦМ. Этот метод, а также результаты исследований пазовых полей целесообразно использовать для расчета электрических машин с высокими электромагнитными нагрузками, где необходимо определять магнитное поле исходя из реальной зубчатой структуры якоря и с учетом нелинейных свойств ферромагнитных материалов машины.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований и выводы заключаются в следующем:

1. Получено общее аналитическое решение задачи определения магнитного поля в основных частях прямоугольного и трапециoidalного пазов при произвольном распределении токов внутри последних и при произвольных граничных условиях в виде касательной составляющей напряженности поля. Показана возможность представления магнитного поля в пазу в виде пяти взаимно независимых слагаемых, одно из которых определяется только током в пазу (поле пазового рассеяния), а остальные четыре - функциями граничных условий (поля ферромагнитного влияния прилегающих к пазу зубцов и спинки якоря и поле шлицевого влияния).

2. Получены формулы для определения потокосцепления многовитковых секций с произвольно распределенным в прямоугольном и трапециoidalном пазах магнитным полем.

3. Исследование поля пазового рассеяния показало, что как для зубцовых обмоток, так и для обмоток обычного исполнения, расположенных в неглубоких пазах и имеющих толстую боковую пазовую изоляцию (например, высоковольтные электрические машины), общепринятое упрощенное представление о поле рассеяния не соответ-



вует действительности. Полученные в работе аналитические формулы позволяют внести существенные уточнения в расчет как поля рассеяния, так и соответствующих коэффициентов относительных магнитных проводимостей само- и взаимоиндукции рассеяния.

4. На основании выполненных расчетов полей ферромагнитного влияния зубцов и спинки якоря и поля шлицевого влияния произведено исследование этих слагаемых пазовых полей и установлено, что из них наиболее существенным является обусловленное насыщением поле ферромагнитного влияния зубцов якоря. Показано, что это слагаемое пазового поля во многих случаях сопоставимо с полем рассеяния. В связи с этим при учете влияния пазовых полей на степень насыщения зубцов якоря в первую очередь должны рассматриваться поля рассеяния и ферромагнитного влияния зубцов якоря.

5. Примеры расчета поля в зубцах якоря с учетом пазовых потоков показали, что совместное действие пазовых полей рассеяния и ферромагнитного влияния в значительной мере изменяет насыщение зубцов и тем самым — распределение потоков по последним. Пренебрежение пазовыми полями или грубый их учет при определении потоков зубцов и потокосцеплений секций их охватывающих приводит к ошибкам, достигающим 20%.

6. На базе аналитических исследований получены формулы и даны графические зависимости для определения коэффициентов потокосцеплений секций обмотки якоря с полями шлицевого и ферромагнитного влияния при разном характере изменения касательных составляющих напряженности поля на границах паза.

7. Разработана общая методика расчета магнитной цепи активной зоны машины с учетом влияния пазовых полей на степень насыщения ферромагнитных элементов якоря, базирующаяся на припасовывании ферромагнитных

и линейно-магнитных областей по пограничным условиям. На примере синхронной явнополюсной машины показана возможность практического использования разработанной методики для расчета потоков зубцов, исходя из реальной конфигурации зубчатого якоря, заданных в его пазовых пространствах токах и с учетом нелинейных свойств ферромагнитных материалов машины.

8. Правильность теоретических положений и результатов настоящей работы подтверждена экспериментальными исследованиями магнитного поля на специально сконструированной и построенной электромашинной модели.



Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих статьях:

1. В.К.Лапшин. Проблема учета насыщения в синхронных явнополюсных машинах (обзор предложенных методов). - В кн. Бесконтактные электрические машины, IX, Рига, 1970.
2. Ю.И.Дикин, В.К.Лапшин. Критерии подобия магнитного поля синхронной явнополюсной машины. - В кн. Бесконтактные электрические машины, X, Рига, 1971.
3. Ю.И.Дикин, В.К.Лапшин. Электромашинная модель для исследования магнитного поля в синхронных машинах. - В кн. Бесконтактные электрические машины, X, Рига, 1971.
4. В.В.Апсит, В.К.Лапшин. Магнитное поле в пазу электрической машины. - Изв. АН Латв.ССР, сер. физ. и техн. наук, 1972, 6.
5. В.В.Апсит, В.К.Лапшин. Магнитное поле пазового рассеяния. - Изв. АН Латв.ССР, сер. физ. и техн. наук, 1973, 4.
6. В.В.Апсит, В.К.Лапшин. Пазовое поле ферромагнитного влияния зубцов якоря электрической машины. - Изв. АН Латв.ССР, сер. физ. и техн. наук, 1973, 4.
7. В.В.Апсит, В.К.Лапшин. Потокосцепление пазовых полей электрической машины. - Изв. АН Латв.ССР, сер. физ. и техн. наук, 1974, I.

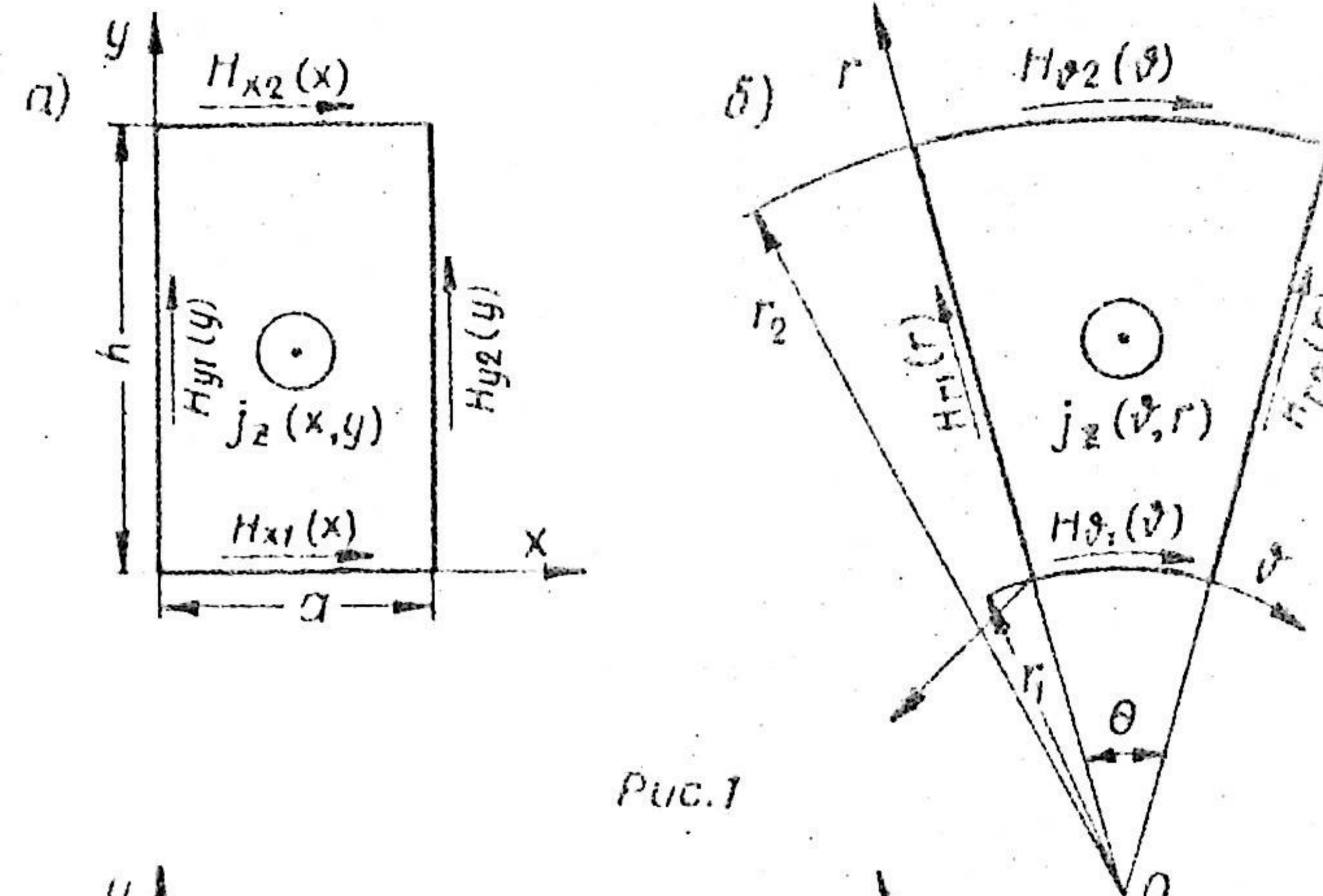


Рис. 1

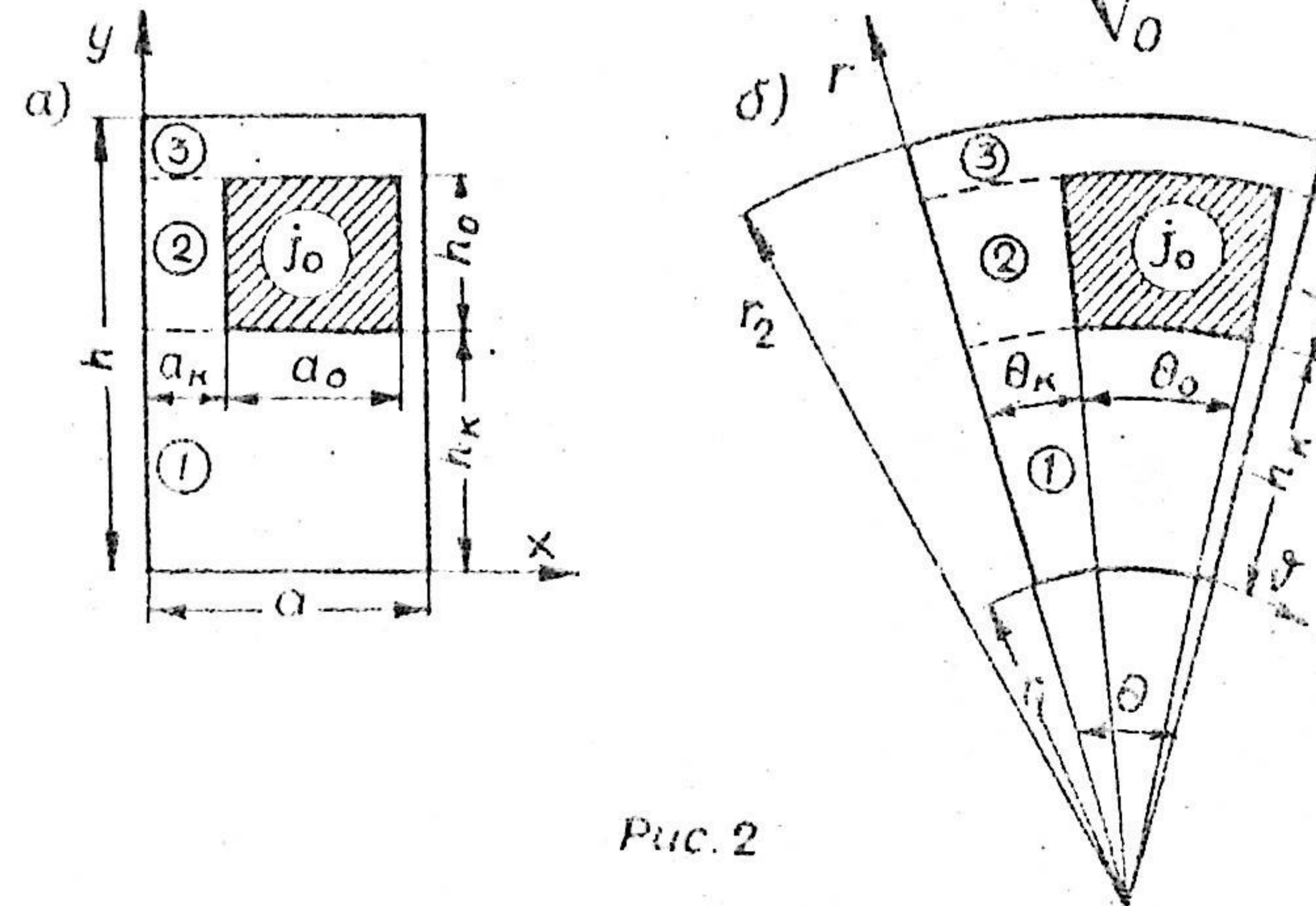


Рис. 2



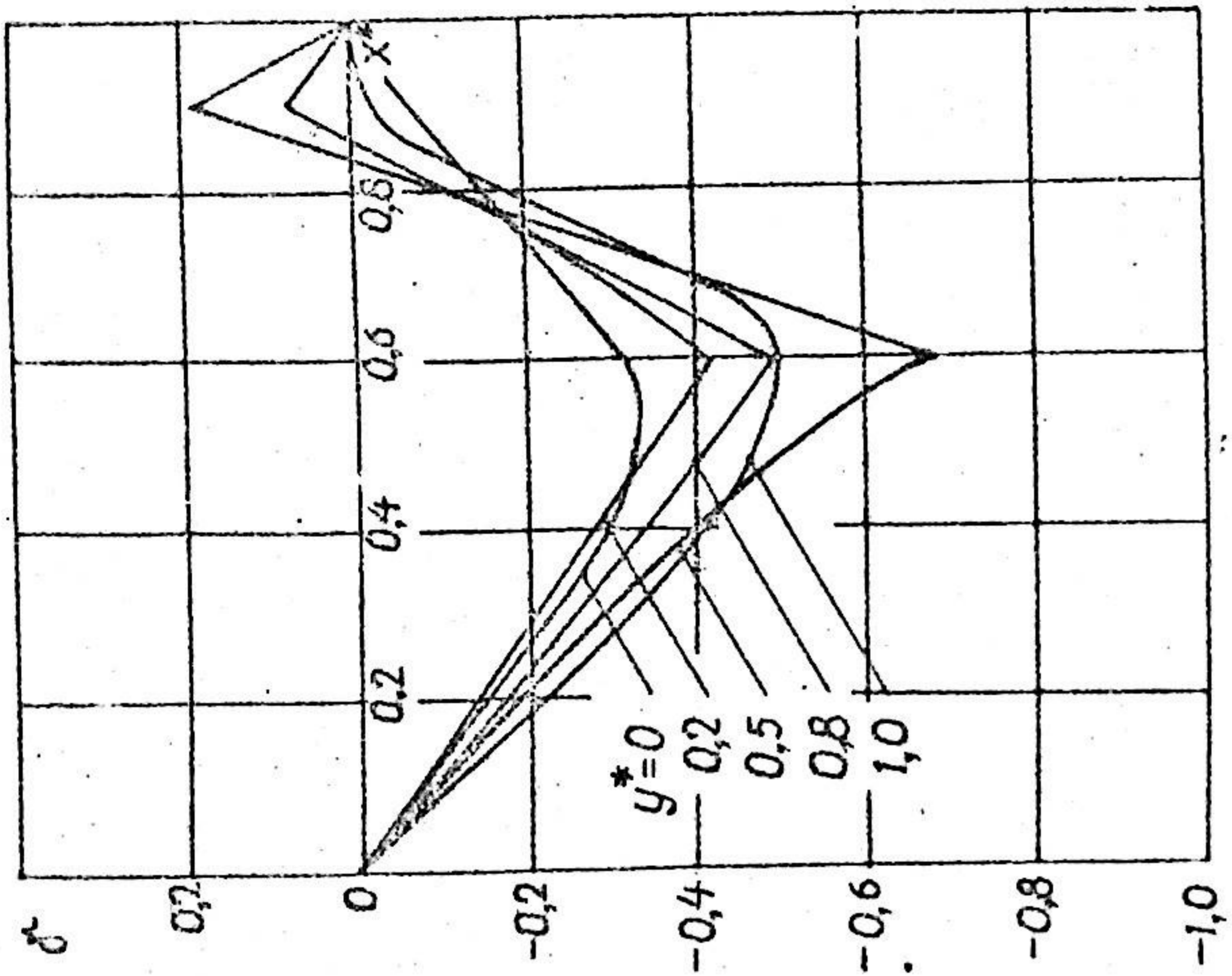


Рис. 4

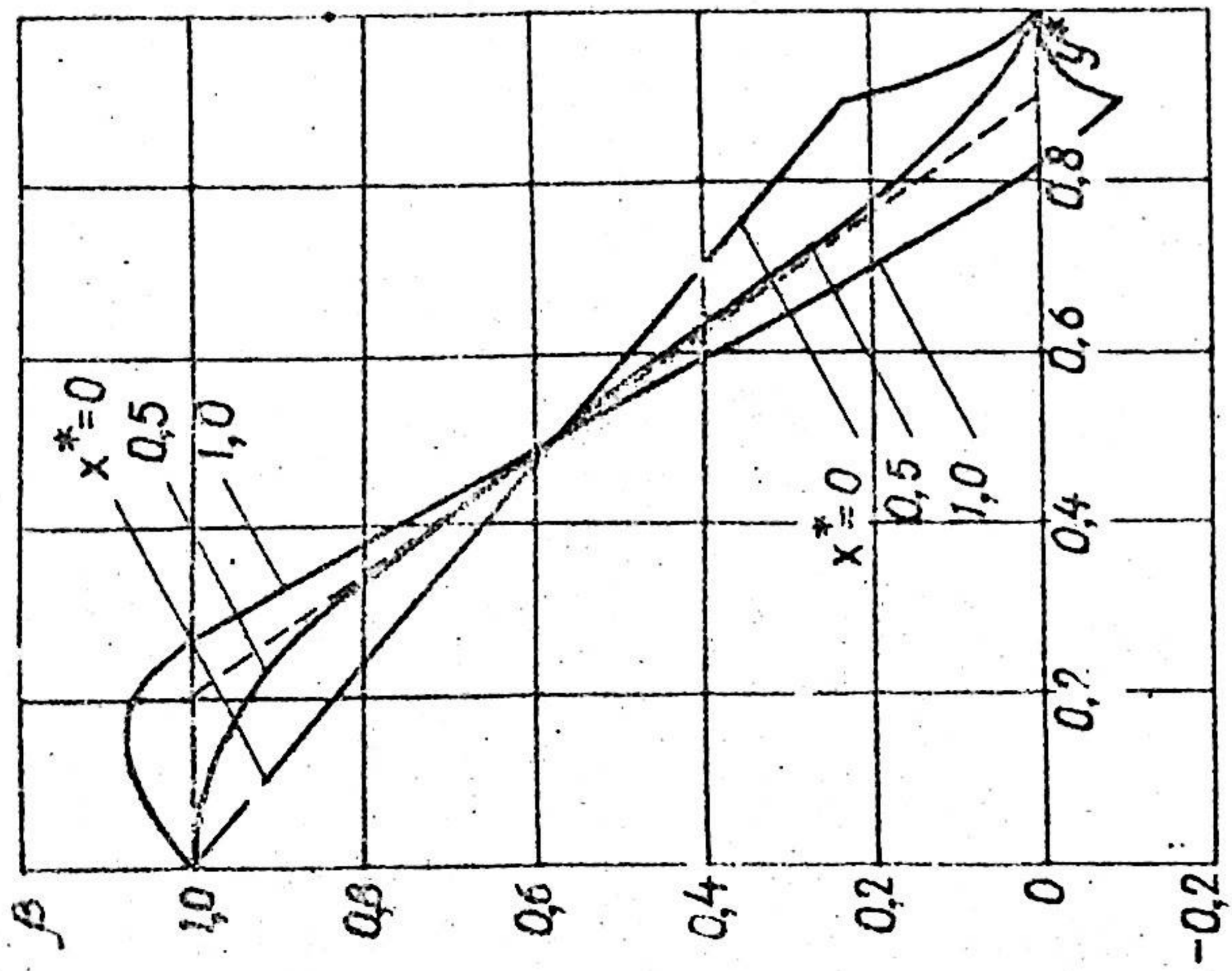


Рис. 5

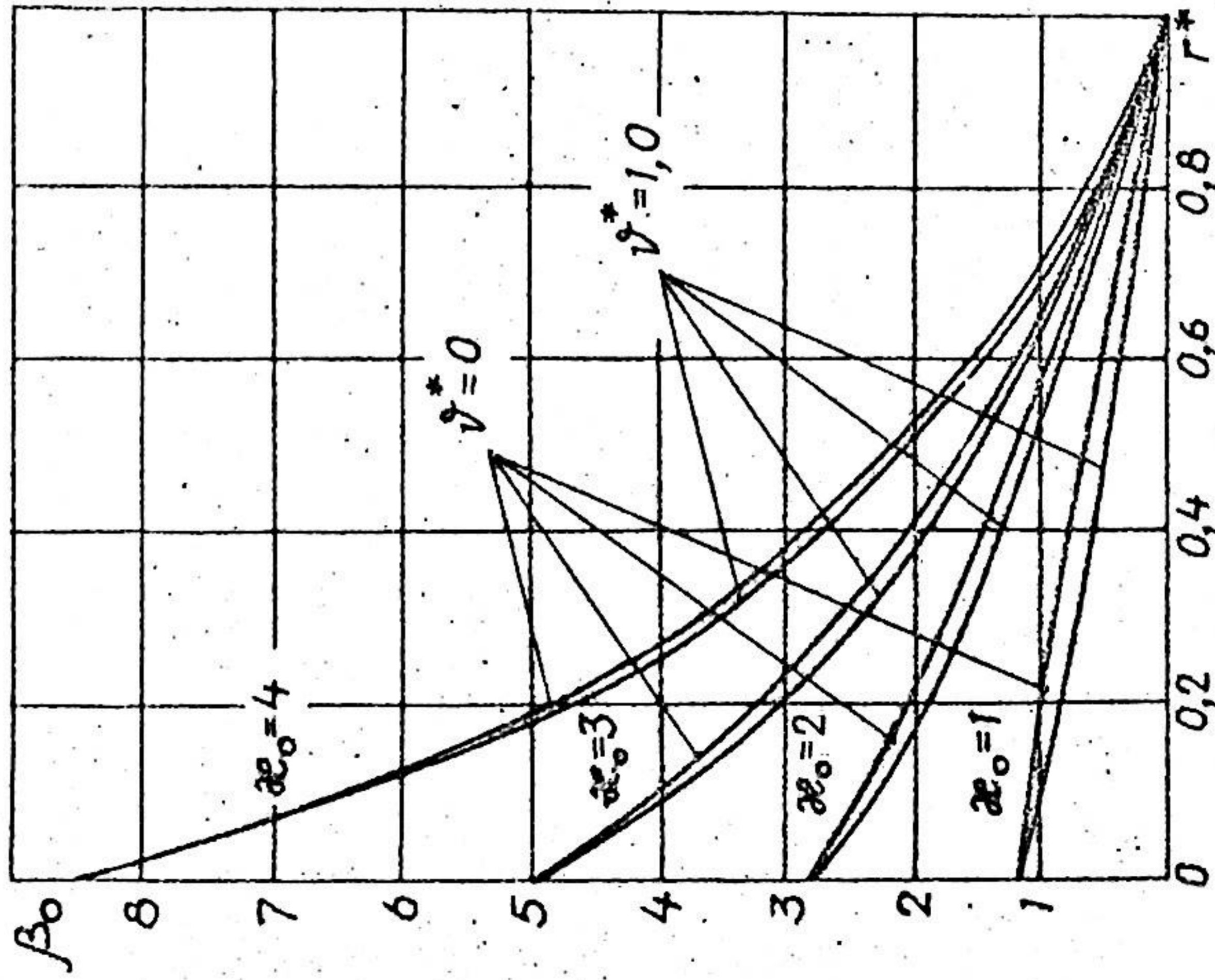


Рис. 5

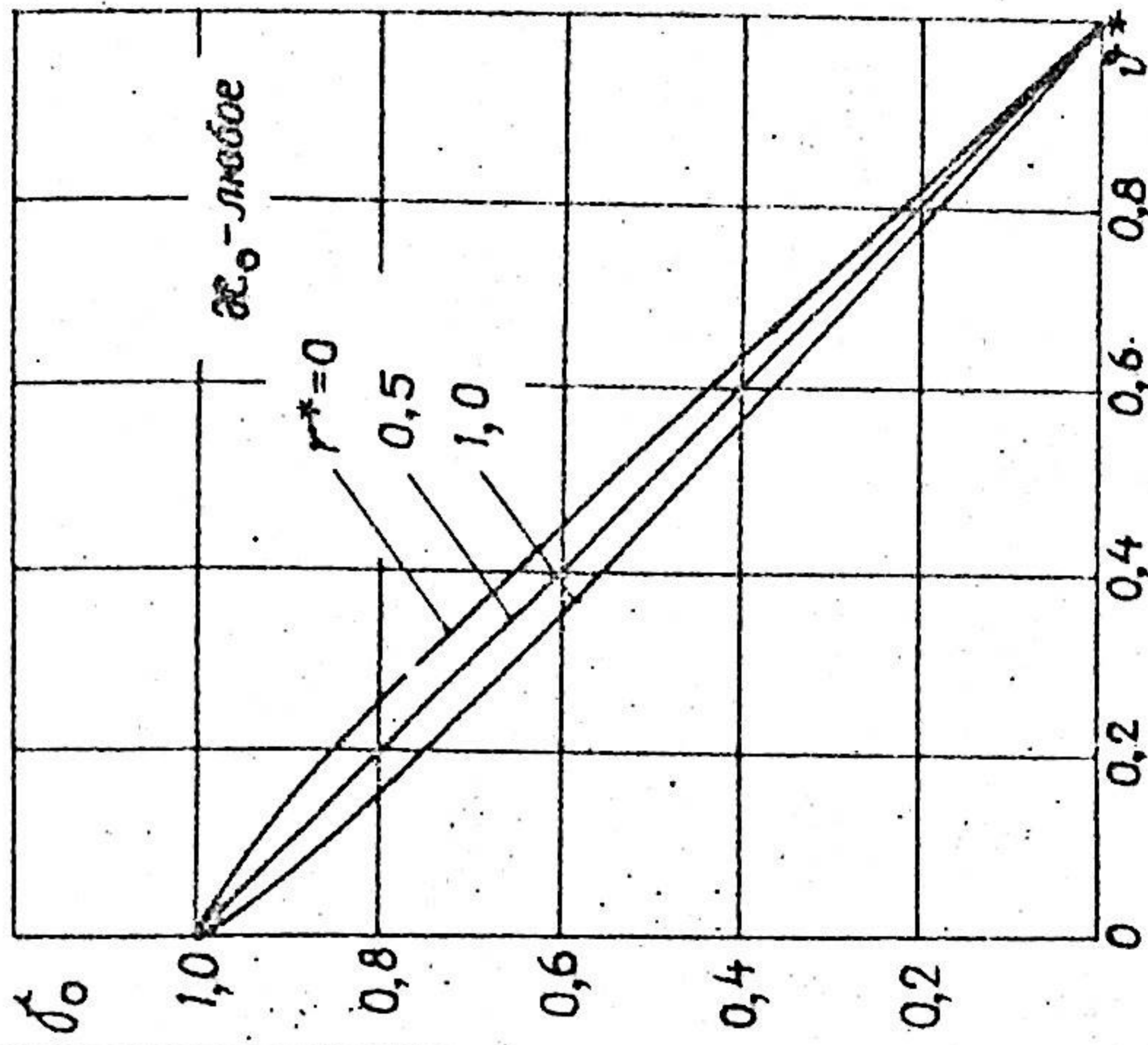


Рис. 6



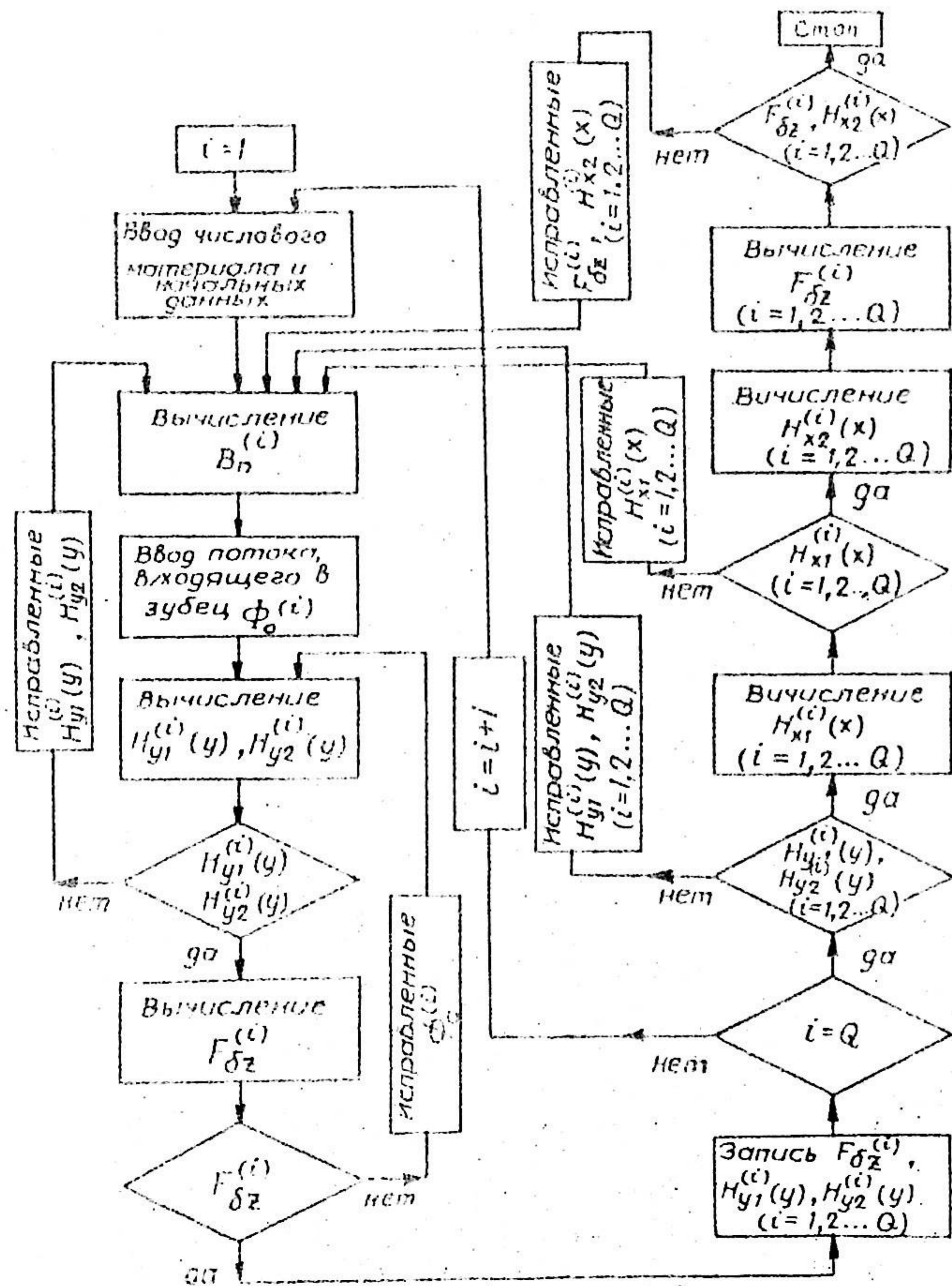


Рис. 7

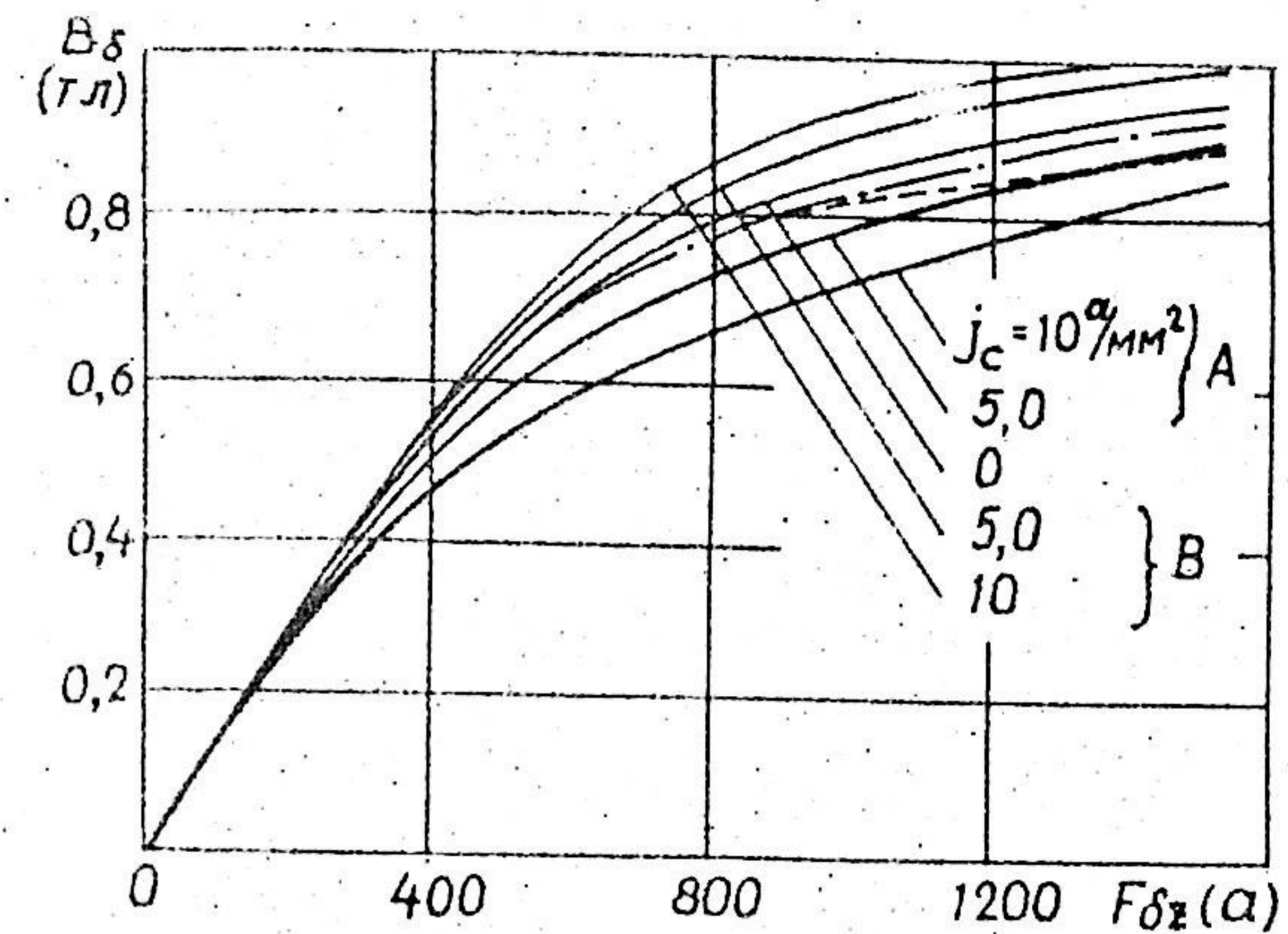


Рис. 8

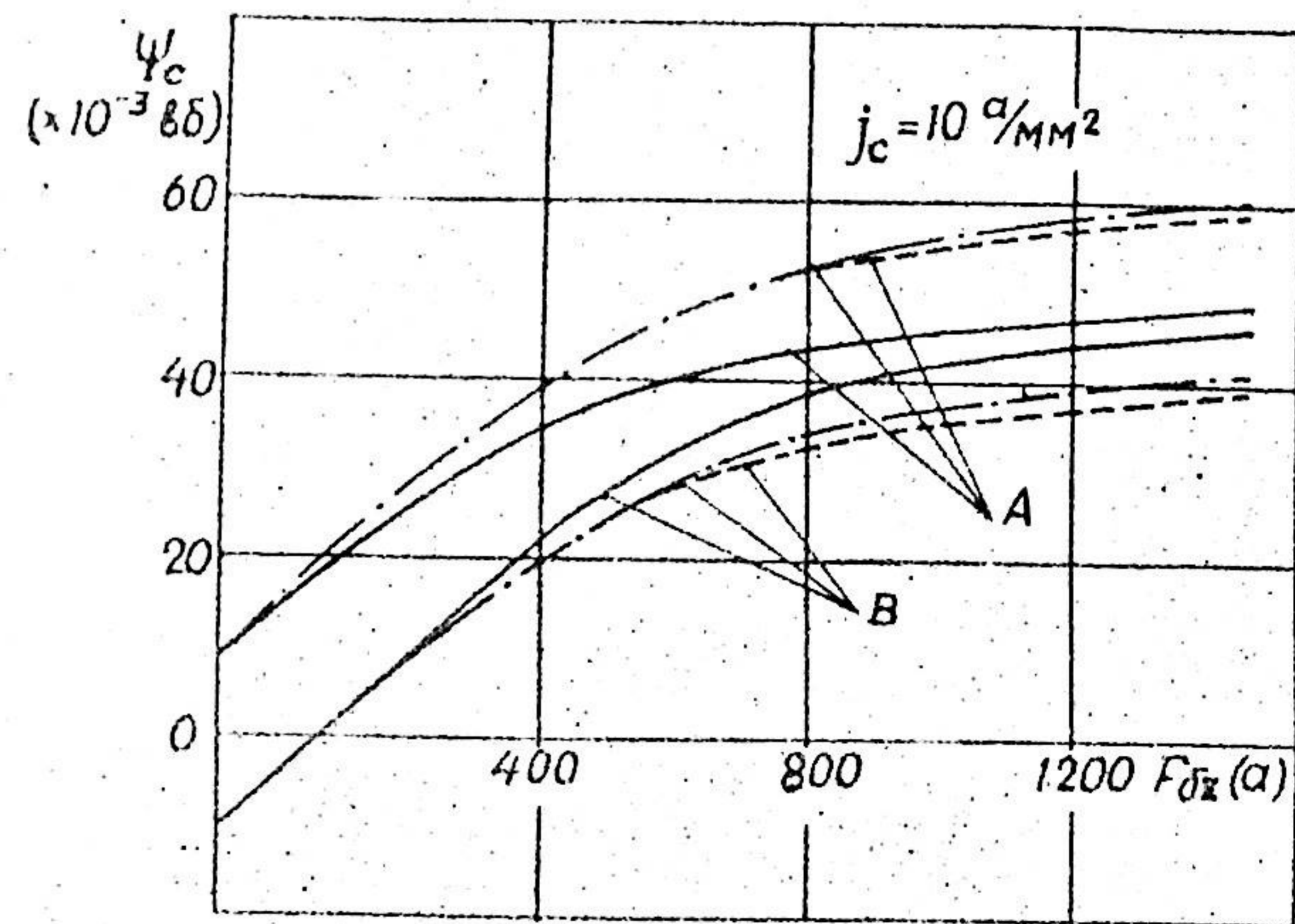


Рис. 9



Подписано и печати 28.6.74 г.  
ЯТ 06344, заказ № 135.  
Тираж 200 экз. Бесплатно.  
Отпечатано на роталпринте  
ФБ АН Латв.ССР  
г.Рига, ул. Комунала 4.