

6  
A-60

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР  
Объединенный Совет Отделения физических и  
технических наук

ДИКИН ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ  
НАСЫЩЕННОЙ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

(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

ДИКИН ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ  
НАСЫЩЕННОЙ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

(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:

- доктор технических наук Н.Н.ЛЕВИН
- кандидат технических наук А.Я.ВИЛНИТИС

Ведущее предприятие - Московский ордена Ленина электромеханический завод имени Владимира Ильича

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

Защита диссертации состоится " ... " .....1974 г. на заседании Объединенного Совета Отделения физико-технических наук АН Латвийской ССР (г.Рига, ГСП, 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/

Индукторные генераторы в настоящее время находят широкое применение в различных отраслях народного хозяйства нашей страны. Простота конструкции, надежность, большой срок службы и другие положительные качества позволяют с успехом использовать машины такого типа в качестве источников питания автономных электроустановок на транспорте (авиация, автомобильный и железнодорожный транспорт), в металлургической, горнодобывающей, химической промышленности и других областях техники. В последние годы осуществляются мероприятия по освоению новых источников питания сварочной дуги на базе индукторных генераторов.

Во многих случаях, например, с целью обеспечения широкого диапазона регулирования тока (сварочные генераторы индукторного типа) или высокой стабильности выходного напряжения (индукторные тахогенераторы), для питания потребителей, работающих в повторно-кратковременных режимах с малой продолжительностью включения и т.п., индукторные генераторы специально рассчитывают на режимы работы с весьма значительной степенью насыщения магнитной цепи, когда точный учет нелинейности во многом предопределяет получение заданных характеристик машины.

Вместе с тем применяемые в инженерной практике методы учета насыщения в индукторных машинах зачастую основываются на упрощенных представлениях, недостаточно полно отражающих действительную картину магнитного поля. В особенности это относится к широко распространенному классу аксиальных индукторных машин с полузакрытыми пазми якоря. Расчет характеристик таких машин в большинстве случаев осуществляется с использованием коэффициентов магнитных полей, полученных на базе ли-

нейной теории для идеализированного "гладкого" якоря, а насыщение учитывается с помощью поправочных коэффициентов, определяемых из характеристик намагничивания машины. Такие упрощенные представления хотя и удобны для расчетов, однако дают значительные ошибки в определении характеристик машины с насыщенной магнитной цепью.

В связи с этим исследование магнитных полей в активной зоне аксиальной индукторной машины с учетом действительной конфигурации ее элементов и нелинейных свойств ферромагнетиков, и разработка на этой основе практической методики расчета магнитного поля представляют собой актуальную задачу. Решение такой задачи и посвящена настоящая диссертационная работа.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложений и списка литературы.

В первой главе исследованы основные особенности распределения магнитного поля в активной зоне аксиальной индукторной машины (рис.1) в установившихся режимах работы. Исследования проводились на статической электромашиной модели трехфазной индукторной машины при питании ее обмоток постоянными токами. Величина тока каждой фазы соответствовала мгновенному значению переменного тока. Необходимый режим нагрузки обеспечивался заданием начальной фазы тока  $\psi$  и взаимного положения ротора и статора  $\vartheta = \omega t$ , устанавливаемого с помощью поворотного устройства.

Картина магнитного поля в исследуемом режиме нагрузки определялась посредством измерения магнитных потоков в измерительных витках, охватывающих зубцы якоря. Исследования проводились в режиме холостого хода, для продольного и поперечного полей якоря, а также при одновременном действии н.с. якоря и возбуждения в широком

диапазоне изменения амплитуды плотности тока  $j_{am}$ , величины н.с. возбуждения  $F_A$ , приложенной к активной зоне, и характера нагрузки  $\psi$ . Результаты исследований представлены в безразмерной критериальной форме.

В качестве примера на рис.2 приведены кривые изменения потоков  $\Phi_z^*$  в различных сечениях зубцов якоря в функции поворота ротора  $\vartheta$  для ряда значений величины н.с.  $F_A^*$  (кривая 1 - поток зубца в воздушном зазоре, кривая 2 - в сечении на границе с коронкой, 3 - в основании зубца). Как видно, с ростом величины н.с.  $F_A^*$  в связи с насыщением зубцов якоря в зубцовом слое происходит перераспределение потоков между зубцами, особенно сильно проявляющееся вблизи края полюса (зубца ротора), где разница в насыщении соседних зубцов якоря наиболее значительна. Появление поперечных пазовых потоков, значительная часть которых проходит по коронкам зубцов, приводит к тому, что характер изменения потока во времени в различных сечениях зубцов становится существенно неодинаковым (рис.2), и для определения потокосцепления обмотки якоря с полем возбуждения оказывается недостаточным знание картины поля в воздушном зазоре, поскольку часть потока, входящего из воздушного зазора в зубцы якоря в пределах полюса, ответвляется затем в зубцы, расположенные за его пределами. Различие в величинах действительной э.д.с. обмотки якоря и расчетной э.д.с., определенной из кривой поля в воздушном зазоре, при высокой степени насыщения зубцов якоря достигает 15 %.

Следует отметить, что один из наиболее распространенных методов учета насыщения в индукторных машинах, базирующийся на использовании переходных характеристик, не учитывает это весьма важное обстоятельство, поскольку при построении таких характеристик проводимость каж-

дого зубцового деления якоря определяется независимо от соседних зубцов.

В реальных режимах нагрузки при одновременном действии н.с. якоря и возбуждения перераспределение потоков между зубцами в воздушном зазоре и в зубцовом слое якоря носит значительно более сложный характер, зависящий не только от величины н.с.  $F_A$ , но и от величины  $J_{am}$  и характера нагрузки  $\psi$ .

Показано, что достаточно подробное и точное представление о магнитном поле в активной зоне дает картина распределения магнитных потоков в различных сечениях зубцов якоря, и поэтому определение этих потоков в функции положения зубцов якоря на зубцовом делении ротора может быть принято за основу для создания практической методики расчета магнитного поля в активной зоне аксиальной индукторной машины. При этом наиболее важное значение приобретает задача определения потоков, входящих в зубцы якоря из воздушного зазора, поскольку они определяют в основном степень насыщения зубцов и величину полного потокосцепления обмотки якоря. Имеющиеся в литературе данные недостаточны для определения этих потоков с учетом реальной конфигурации воздушного зазора и насыщения коронок зубцов, поэтому в следующих главах проведено исследование магнитного поля в воздушном зазоре и прилегающих к нему областях коронок зубцов.

Учитывая, что насыщение коронок зубцов может иметь место в основном для зубцов якоря, расположенных в пределах полюса (зубца яротора), задача рассматривается отдельно для областей, расположенных в пределах полюса и в междуполюсном промежутке (пазу ротора).

Во второй главе приведены результаты исследования магнитного поля в областях коронок зубцов якоря, расположенных в пределах полюса (рис.3). При

этом для исследования был принят метод физического моделирования как наиболее доступный и точный метод решения сложных нелинейных задач.

В результате исследования картины магнитного поля в воздушном зазоре показано, что даже при значительной степени насыщения коронок зубцов поле вблизи оси зубца якоря остается равномерным. Поэтому для определения потоков, входящих в основную часть зубца (потоки  $\varphi_{z1}$ ,  $\varphi_{z2}$  на рис.3), при заданных значениях индукций в воздушном зазоре по оси зубцов ( $B_1, B_2$ ) с помощью модели достаточно определить потоки коронок  $\varphi_k$ , включая участки в воздушном зазоре с неравномерным распределением индукции (участки  $a_k$  на рис.3), а часть потока на участке  $t - c - 2a_k$  с равномерным распределением индукции определяется как произведение проводимости равномерного зазора на величину индукции в зазоре по оси зубца.

Анализ условий подобия магнитного поля в области коронок зубцов показал, что относительная величина потока коронки  $\varphi_k^* = \frac{\varphi_k}{B_1 a_k}$ , где  $\varphi_k$  - поток коронки на единицу длины машины, при условии идентичности материалов модели и оригинала определяется следующими обобщенными переменными:

относительными геометрическими размерами (рис.3)

$$b_k^* = \frac{b_k}{h}, \quad c^* = \frac{c}{h}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{h}, \quad \alpha,$$

относительными индукциями в воздушном зазоре по оси двух соседних зубцов

$$B_1^* = \frac{B_1}{\mu_5 H_5}, \quad B_2^* = \frac{B_2}{\mu_5 H_5},$$

где  $\mu_5, H_5$  - магнитная проницаемость и напряженность магнитного поля, принимаемые за базисные.

Задача исследования заключалась в получении многомерной критериальной зависимости

$$\varphi_k^* = f(B_1^*, B_2^*, b_k^*, c^*, \delta^*, \alpha) \quad (I)$$

при варьировании входящих в уравнение (I) независимых переменных в диапазоне возможного изменения их в оригинале. Для этой цели была специально сконструирована модель, параметры которой выбраны по заданному диапазону изменения обобщенных переменных (I). В качестве базисных величин магнитной проницаемости и напряженности магнитного поля при этом были выбраны  $\mu_g = 4,54 \cdot 10^{-3}$  Гн/м и  $H_g = 6600$  а/м. Измерение магнитных потоков коронки  $\varphi_k$  производилось с помощью микроверметра, присоединенного к измерительному контуру, уложенному на поверхности коронки зубца (2-3-4-I на рис.3), а исследование картины магнитного поля в зазоре - с помощью теслаамперметра типа Ф 4354/I, снабженного датчиком Холла.

Определение численных значений относительных потоков коронки  $\varphi_k^*$  производилось для следующих значений относительных геометрических параметров:  $\delta^* = 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4$ ;  $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ;  $b_k^* = 3,3; 4,4; 5,5; 6,6; 7,7$ ;  $c^* = 3,4,5,6,7$  при изменении индукции в воздушном зазоре от 0,2 до 1,2 тл. При этом на основе анализа картины магнитного поля в воздушном зазоре под насыщенной коронкой зубца величина отрезка  $a_k$  для всех значений геометрических параметров была выбрана равной  $a_k = 2b_k$ . В качестве примера на рис.4 приведено семейство кривых  $\varphi_k^* = f(B_1^*, B_2^*)$  при значениях  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\delta^* = 1,6$ ,  $b_k^* = 5,5$  и  $c^* = 5$ . Анализ такого рода кривых показал, что практически во всем диапазоне изменения независимых переменных в уравнении (I) зависимость потока коронки  $\varphi_k^*$  рассматриваемого зубца от величины относительной индукции в воздушном зазоре на оси соседнего

зубца ( $B_2^*$ ) при каждом фиксированном значении индукции  $B_1^*$  близка к линейной. Поэтому зависимость относительного потока коронки от относительных параметров  $B_1^*$  и  $B_2^*$  оказалось возможным представить в виде линейного соотношения

$$\varphi_k = \frac{1}{2} \left[ \varphi_k^{*'} + \varphi_k^{*''} + (\varphi_k^{*'} - \varphi_k^{*''}) \frac{B_2^*}{B_1^*} \right], \quad (2)$$

где  $\varphi_k^{*'}$ ,  $\varphi_k^{*''}$  - частичные относительные потоки, определенные при условии соответственно

$$B_1^* = B_2^*, \quad B_1^* = -B_2^*. \quad (3a), (3b)$$

Для определения зависимости частичных относительных потоков  $\varphi_k^{*'}$ ,  $\varphi_k^{*''}$  от величины относительной индукции  $B_1^*$  из семейства кривых типа рис.4 необходимо выбрать ряд точек, соответствующих  $B_1^* = B_2^*$  и  $B_1^* = -B_2^*$  и соединить их плавными кривыми. На рис.5 в качестве примера приведены кривые частичных потоков  $\varphi_k^{*'}(B_1^*)$ ,  $\varphi_k^{*''}(B_1^*)$  для случая, когда  $\alpha = 30^\circ$ ,  $b_k^* = 5,5$  и  $c^* = 5$ . Выбрав для каждой из кривых такого семейства некоторые базисные значения величин частичных потоков  $\varphi_{k\delta a z}^{*'}$  и  $\varphi_{k\delta a z}^{*''}$  (в качестве базисных выбраны максимальные значения этих потоков) каждое из таких семейств кривых может быть сведено к одной кривой вида

$$\varphi_k^' = f(\beta^'), \quad \varphi_k^'' = f(\beta^''), \quad (4)$$

где обозначено

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k^' &= \frac{\varphi_k^{*'}}{\varphi_{k\delta a z}^{*'}} \\ \varphi_k^'' &= \frac{\varphi_k^{*''}}{\varphi_{k\delta a z}^{*''}} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} \beta^' &= \frac{B_1^*}{B_{1\delta a z}^{*'}} \\ \beta^'' &= \frac{B_1^*}{B_{1\delta a z}^{*''}} \end{aligned} \right\} \quad (5), (6)$$

а величины  $B_{1\delta a3}^{*'}$  и  $B_{1\delta a3}^{*''}$  выбраны из условия наилучшего совпадения относительных кривых (4). На рис.6 приведены полученные указанным способом обобщенные кривые частичных относительных потоков  $\varphi_{\kappa}^{*'}$ ,  $\varphi_{\kappa}^{*''}$ . Зависимости базисных величин  $\varphi_{\kappa\delta a3}^{*'}$  и  $\varphi_{\kappa\delta a3}^{*''}$  от параметров  $\delta^*$  и  $\alpha$  аппроксимированы следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \varphi_{\kappa\delta a3}^{*'} &= a'(\alpha) \delta^* + b'(\alpha), \\ \varphi_{\kappa\delta a3}^{*''} &= a''(\alpha) \delta^* + b''(\alpha), \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a'(\alpha) &= 0,022 + 0,635 \cdot 10^{-3} \alpha, \\ a''(\alpha) &= 0,143 + 0,0241 \cdot 10^{-3} \alpha^2, \\ b'(\alpha) &= 1,04 + 0,605 \cdot 10^{-3} \alpha, \\ b''(\alpha) &= 1,01 + 0,216 \cdot 10^{-2} \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Базисные значения параметров  $B_{1\delta a3}^{*'}$  и  $B_{1\delta a3}^{*''}$  для всех значений  $\alpha$  оказались одинаковыми и зависящими лишь от параметра  $\delta^*$

$$\begin{aligned} B_{1\delta a3}^{*'} &= 7,2 \cdot 10^{-3} - 0,208 \cdot 10^{-3} \delta^*, \\ B_{1\delta a3}^{*''} &= 7,96 \cdot 10^{-3} - 0,55 \cdot 10^{-3} \delta^*. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для определения зависимости частичных относительных потоков  $\varphi_{\kappa}^{*'}$ ,  $\varphi_{\kappa}^{*''}$  от всех регулируемых переменных достаточно иметь зависимости  $\varphi_{\kappa}^{*'}(B_{\kappa}^*, \delta^*, \alpha)$ ,  $\varphi_{\kappa}^{*''}(B_{\kappa}^*, \delta^*, \alpha)$ , полученные для средних значений относительных параметров  $b_{\kappa}^*$  и  $c^*$  и кривые поправочных коэффициентов  $\xi'(b_{\kappa}^*)$ ,  $\xi''(b_{\kappa}^*)$ ,  $\chi'(c^*)$ ,  $\chi''(c^*)$ . Кривые поправочных коэффициентов (рис.7) были получены в результате обработки данных экспериментов при варьировании параметров  $b_{\kappa}^*$  и  $c^*$ . В результате для частичных относительных потоков коронки  $\varphi_{\kappa}^{*'}$ ,  $\varphi_{\kappa}^{*''}$  получены выражения

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\kappa}^{*'} &= \varphi_{\kappa}^{*'}(b_{\kappa}^*, \alpha) \varphi_{\kappa\delta a3}^{*'}(\delta^*, \alpha) \xi'(b_{\kappa}^*) \chi'(c^*), \\ \varphi_{\kappa}^{*''} &= \varphi_{\kappa}^{*''}(b_{\kappa}^*, \alpha) \varphi_{\kappa\delta a3}^{*''}(\delta^*, \alpha) \xi''(b_{\kappa}^*) \chi''(c^*). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Обобщенные зависимости (10) совместно с выражением (2) и кривыми рис.6-7 позволяют определить величины потоков зубцов с учетом насыщения коронок для широкого диапазона изменения геометрических размеров коронок и величин индукций в воздушном зазоре.

В третьей главе проведено аналитическое исследование магнитного поля в междупольном пространстве (пазу ротора) индукторной машины (рис.8а).

Учитывая, что в междупольном пространстве коронки зубцов якоря ненасыщены и полость поверхности ротора эквипотенциальной, граничные условия в рассматриваемой области могут быть заданы в виде импульсно-разрывных функций касательной составляющей напряженности магнитного поля (рис.8б,в), отличных от нуля только в шлицах пазов якоря и в воздушном зазоре у краев полюса.

Решение уравнения Лапласа для векторного потенциала  $A(x, y)$  методом собственных функций дает выражения для составляющих вектора магнитной индукции в междупольном пространстве в виде трех взаимонезависимых слагаемых

$$\left. \begin{aligned} B_x(x, y) &= B_x^{(a)}(x, y) + B_x^{(1)}(x, y) + B_x^{(2)}(x, y) \\ B_y(x, y) &= B_y^{(a)}(x, y) + B_y^{(1)}(x, y) + B_y^{(2)}(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

одно из которых  $B^{(a)}(x, y)$  определяется граничным условием на поверхности расточки якоря  $H_{2x}(x)$  (поле якоря), а два других  $B^{(1)}(x, y)$ ,  $B^{(2)}(x, y)$  - граничными условиями на боковых сторонах междупольного промежутка (поле возбуждения).

Поле якоря может быть представлено в виде суммы полей, создаваемых намагничивающими силами в каждом из

шлицов якоря

$$\left. \begin{aligned} V_x^{(a)}(x, y) &= \sum_{p=1}^R \left[ V_{xpo}(x, y) + \sum_{v=1}^{\infty} V_{xpv}(x, y) \right], \\ V_y^{(a)}(x, y) &= \sum_{p=1}^R \left[ V_{yp0}(x, y) + \sum_{v=1}^{\infty} V_{ypv}(x, y) \right], \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $p$  - номер шлица паза якоря (рис. 8а);  
 $v$  - номер гармоники напряженности магнитного поля в  $p$ -ом шлице;  
 $R$  - количество пазов якоря, расположенных против паза ротора.

Величины  $V_{xpo}$ ,  $V_{yp0}$ ,  $V_{xpv}$ ,  $V_{ypv}$  представляют собой составляющие вектора магнитной индукции, обусловленные постоянной ( $H_{po}$ ) и гармоническими ( $H_{pv}$ ) составляющими напряженности магнитного поля в  $p$ -ом шлице. Постоянная составляющая  $H_{po}$  определяется полным током в данном  $p$ -ом пазу за вычетом падения н.с. в прилегающих к нему зубцах. Что же касается гармоник напряженности магнитного поля в шлицах пазов  $H_{pv}$ , то для их определения необходимо, вообще говоря, производить сложную операцию стыковки полученного решения (12) с решениями для шлицевых областей пазов якоря. Однако, как показал анализ проведенных расчетов, для практически встречающихся в машинах с полузакрытыми пазами якоря отношений раскрытия шлица к зубцовому делению  $c/t$ , равных 0,1-0,3, влиянием гармонических составляющих напряженности поля в шлицах пазов якоря  $H_{pv}$  можно пренебречь. Для иллюстрации сказанного на рис. 9 приведены кривые распределения индукции на поверхности расточки якоря в относительных единицах для случая, когда отношение раскрытия шлица паза якоря  $c$  к ширине междупольсного промежутка  $b$  равно

0,1, а координата  $p$ -го шлица  $x_p = 0$ . Из этого рисунка в частности видно, что за пределами шлица паза якоря ( $x/b > 0,1$ ) относительные индукции на поверхности расточки якоря, обуславливаемые гармоническими составляющими напряженности магнитного поля в шлице ( $v > 0$ ) весьма малы по сравнению с полями, обусловленными постоянной составляющей ( $v = 0$ ). Соответственно малыми получаются и величины потоков, которые пропорциональны площадям, очерчиваемым рассматриваемыми кривыми на длине зубцового деления  $t/b$ . В связи с этим при определении потока в произвольном  $i$ -м зубце путем интегрирования второго выражения (12) вдоль зубцового деления ( $x_i + \frac{c}{2} \leq x \leq x_{i+1} - \frac{c}{2}$ ) достаточно учитывать лишь слагаемое  $v = 0$ . В результате для потока в  $i$ -м зубце под действием поля от  $p$ -го шлица получается формула:

$$\beta_{ip} = \frac{\varphi_{ip}}{\varphi_{\text{баз}}^{(p)}} = \frac{8b}{\pi^2(t-c)} \sum_{n=1}^{\infty} ct h\left(\frac{n\pi h}{b}\right) C_{pn} Z_{in}, \quad (13)$$

где

$$C_{pn} = \frac{1}{n^2} \sin\left(\frac{n\pi c}{2b}\right) \cos\left[\frac{n\pi}{b}\left(x_p + \frac{c}{2}\right)\right], \quad (14)$$

$$Z_{in} = \sin\left[\frac{n\pi}{b}\left(x_i - \frac{t}{2}\right)\right] \sin\left[\frac{n\pi}{2b}(t-c)\right], \quad (15)$$

$$\varphi_{\text{баз}}^{(p)} = \mu_0(t-c)H_{po}. \quad (16)$$

В работе проведены расчеты численных значений относительных потоков для ряда значений относительных геометрических параметров  $t/b$ ,  $c/t$ ,  $h/b$ , охватывающих практически все возможные случаи геометрии зубцовой зоны.

Выражения, аналогичные (13), получены и для потоков зубцов якоря, обусловленных граничными условиями на бо-



ковых сторонах паза индуктора (поле возбуждения). Так для относительных потоков  $\beta_i^{(1)}$ , обусловленных граничными условиями на левой стороне паза индуктора (средним значением напряженности поля  $H_{1\delta}$  в воздушном зазоре), имеем

$$\beta_i^{(1)} = \frac{\varphi_i^{(1)}}{\varphi_{\delta_{аз}}^{(1)}} = \frac{\delta}{h} \left(1 - \frac{x_{yi}}{b}\right) + \frac{4h}{\pi^2(t-c)} \sum_{k=1}^{\infty} D_k \Gamma_{ik}^{(1)}, \quad (17)$$

где

$$D_k = \frac{1}{k^2} \sin\left(\frac{k\pi\delta}{h}\right), \quad (18)$$

$$\Gamma_{ik}^{(1)} = \frac{\operatorname{sh}\left[\frac{k\pi(t-c)}{2h}\right] \operatorname{sh}\left[\frac{k\pi b}{h} \left(1 - \frac{x_{yi}}{b}\right)\right]}{\operatorname{sh}\left(\frac{k\pi b}{h}\right)} \quad (19)$$

$$\varphi_{\delta_{аз}}^{(1)} = \mu_0 (t-c) H_{1\delta} \quad (20)$$

$x_{yi}$  — координата центра  $i$ -го зубца якоря, отсчитываемая от левого края паза индуктора.

Выражение для относительных потоков зубцов якоря  $\beta_i^{(2)}$ , обусловленных граничными условиями на правой стороне паза индуктора ( $H_{2y}$ ), получаются заменой координаты  $x_{yi}$  в выражениях (17) и (19) на  $(b - x_{yi})$ . В работе проведены расчеты относительных потоков  $\beta_i^{(2)}$ , обусловленных постоянной составляющей напряженности магнитного поля в воздушном зазоре у края полюса  $H_{1\delta}$  в широком диапазоне изменения геометрии зубцовой зоны и результаты представлены в виде графических зависимостей, удобных для практического использования.

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета магнитного поля в активной зоне с учетом действительной конфигурации и реальных свойств ферромагнетиков.

В основу практической методики расчета положено

определение магнитных потоков в поперечных сечениях зубцов якоря в функции положения их относительно ротора.

Полученные в предыдущих главах диссертации выражения позволяют определить величины потоков, входящих в зубцы якоря со стороны воздушного зазора в произвольный фиксированный момент времени  $\omega t$  при заданных значениях результирующей н.с., приходящейся на каждый зубец с зазором  $F_{\delta z}^{(1)}$  и известных значениях падений н.с. в зубцах  $F_z^{(1)}$ . Для определения последних используется широко применяемый на практике "метод сечений", базирующийся на допущении, что поток по поперечному сечению зубца распределяется равномерно. Представив зависимость падения н.с. в зубцах в виде полинома, степень которого определяется числом выбранных сечений зубца  $M$ , получены уравнения, связывающие искомые величины потоков в выбранных сечениях зубцов с заданными значениями н.с.  $F_{\delta z}^{(1)}$ . При этом влияние пазовых магнитных полей на степень насыщения зубцов якоря учитывается на основе имеющихся в литературе данных по исследованию этих полей, в кривая намагничивания стали зубцов аппроксимирована аналитической функцией (гиперболическим синусом). Полученная таким образом система содержит  $M \cdot Q$  нелинейных уравнений, решение которой дает искомые значения потоков (индукций) в каждом из выбранных  $M$  сечений  $Q$  зубцов на двойном полюсном делении  $2\tau$ . Исходя из физической картины распределения потоков в зубцовой зоне, показано, что полученную систему ( $M \cdot Q$  уравнений) целесообразно решать поэтапно, последовательно решая методом Ньютона отдельные подсистемы из  $M$  уравнений для каждого из  $Q$  зубцов. Решение, полученное на каждом этапе, служит начальным приближением для следующего этапа. Такой поэтапный процесс нагляден, удобен для вычислений на ЭВМ сравнительно малой мощности и требует весьма малых затрат машинного времени ЭВМ.

Полученная система уравнений для определения потоков зубцов достаточно универсальна, так как все входящие в нее коэффициенты определяются из приведенных в работе аналитических выражений. Проведенные с помощью разработанного алгоритма поверочные расчеты магнитного поля в активной зоне аксиальной индукторной машины-модели, описанной в первой главе диссертации, показали достаточно хорошее совпадение с результатами эксперимента. В качестве примера на рис. 10 приведены расчетные и опытные кривые распределения магнитных потоков (средних значений индукций в сечениях зубцов якоря на границах с коронками) для ряда значений величины н.с.  $F_A$  при постоянном значении тока фазы  $I_m = 20$  а и угле  $\psi = 30^\circ$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного теоретического и экспериментального исследования магнитного поля в индукторных машинах одноименнополюсного типа сводятся к следующему:

1. С помощью электромашинной модели выявлены и оценены основные особенности распределения магнитного поля в активной зоне насыщенной аксиальной индукторной машины. Показано, что с насыщением зубцов якоря в зубцовом слое и в воздушном зазоре машины происходит перераспределение потоков между зубцами якоря, существенно изменяющее картину магнитного поля по сравнению с ненасыщенным состоянием. Использование коэффициентов магнитных полей, полученных на основе теории "гладкого" якоря не отражает всей сложности процессов перераспределения потоков в зубцовом слое и дает поэтому значительные ошибки при определении э.д.с. насыщенной индукторной машины.

2. Показано, что сравнительно подробная картина магнитного поля, достаточная для определения основных характеристик насыщенной машины, может быть получена путем опре-

деления магнитных потоков в различных сечениях зубцов якоря в функции положения их относительно ротора.

3. Методом физического моделирования магнитного поля в области воздушного зазора с коронками зубцов якоря получены обобщенные относительные характеристики и эмпирические зависимости, позволяющие определить величины потоков зубцов якоря с учетом действительной конфигурации зазора и насыщения коронок зубцов. Применение при моделировании факторного и классического планов эксперимента позволило значительно сократить количество экспериментов, необходимых для получения многомерной зависимости относительных потоков коронок зубцов от всех определяющих критериев подобия.

4. Аналитически исследовано магнитное поле в междуполюсном пространстве (пазу ротора) индукторной машины, на основе чего получены расчетные формулы для определения магнитных потоков зубцов якоря, расположенных против паза ротора. Показано, что определяющими величинами для магнитных потоков зубцов якоря в междуполюсном промежутке являются постоянные составляющие (нулевые гармоники) напряженности магнитного поля в шлицах пазов якоря и в воздушном зазоре у краев полюса (зубца ротора), влияние гармонических составляющих сравнительно мало и в практических расчетах потоков зубцов якоря ими можно пренебречь.

5. На основе проведенных исследований разработан алгоритм расчета магнитного поля в активной зоне индукторной машины с полузакрытыми пазами якоря, основанный на определении потоков зубцов в зависимости от их положения на полюсном делении ротора с учетом насыщения соседних зубцов и реально распределенных токов в пазах. Предложенный алгоритм полностью отражает основные особенности распределения магнитного поля в активной зоне машины, отличается простотой и обеспечивает высокую точность расчетов.

Проведенные в работе исследования позволяют повысить точность и уменьшить затраты машинного времени при расчете магнитного поля насыщенных индукторных машин и при дальнейшем расчете их характеристик. Основные результаты исследований магнитного поля в отдельных элементах активной зоны могут быть использованы также для расчета и проектирования других типов электрических машин.

Опубликованные работы автора по теме диссертации.

1. Апсит В.В., Домбур Л.Э., Дикин Ю.И., Бондаженко В.А. Бесконтактные сварочные преобразователи индукторного типа. Материалы к Всесоюзному семинару "Пути развития источников питания для электродуговой сварки", г. Вильнюс, 1968.
2. Дикин Ю.И., Лапшин В.К. Критерии подобия магнитного поля синхронной явнополюсной машины. Сб. Бесконтактные электрические машины. X, Рига, изд. "Зинатне", 1971.
3. Дикин Ю.И., Лапшин В.К. Электромашинная модель для исследования магнитного поля в синхронных машинах. Сб. Бесконтактные электрические машины. X, Рига, изд. "Зинатне", 1971.
4. Куркалов И.И., Дикин Ю.И. Учет насыщения зубцовой зоны в электрических машинах. Сб. Бесконтактные электрические машины, XI, Рига, изд. "Зинатне", 1972.
5. Дикин Ю.И. Магнитное поле в области коронок зубцов якоря электрической машины. Изв. АН Латв. ССР, серия физ. и техн. наук, 1973, № 6.
6. Апсит В.В., Дикин Ю.И. Магнитное поле якоря в пазу ротора индукторной машины. Изв. АН Латв. ССР, серия физ. и техн. наук, 1974, № 1.

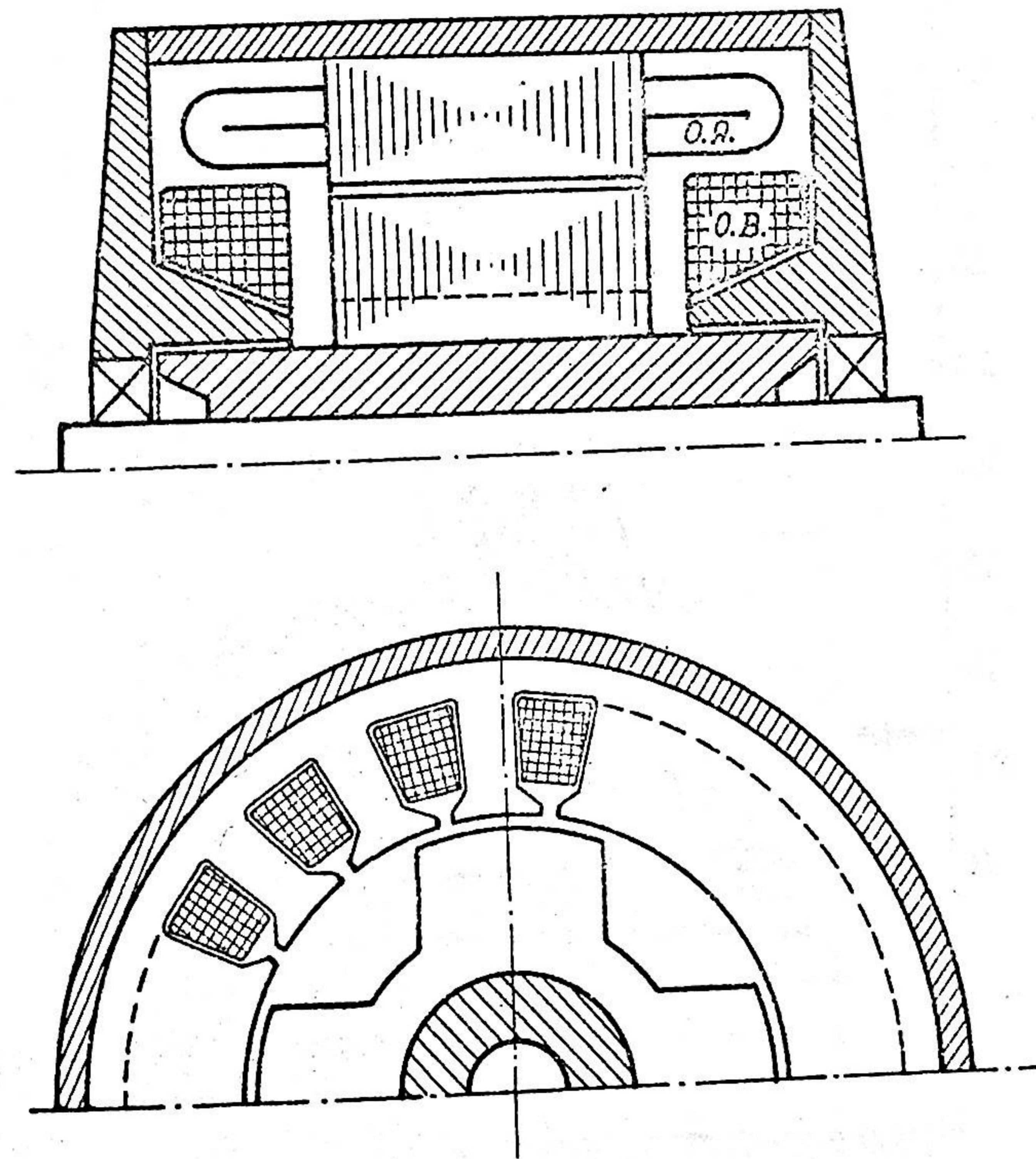


Рис.1

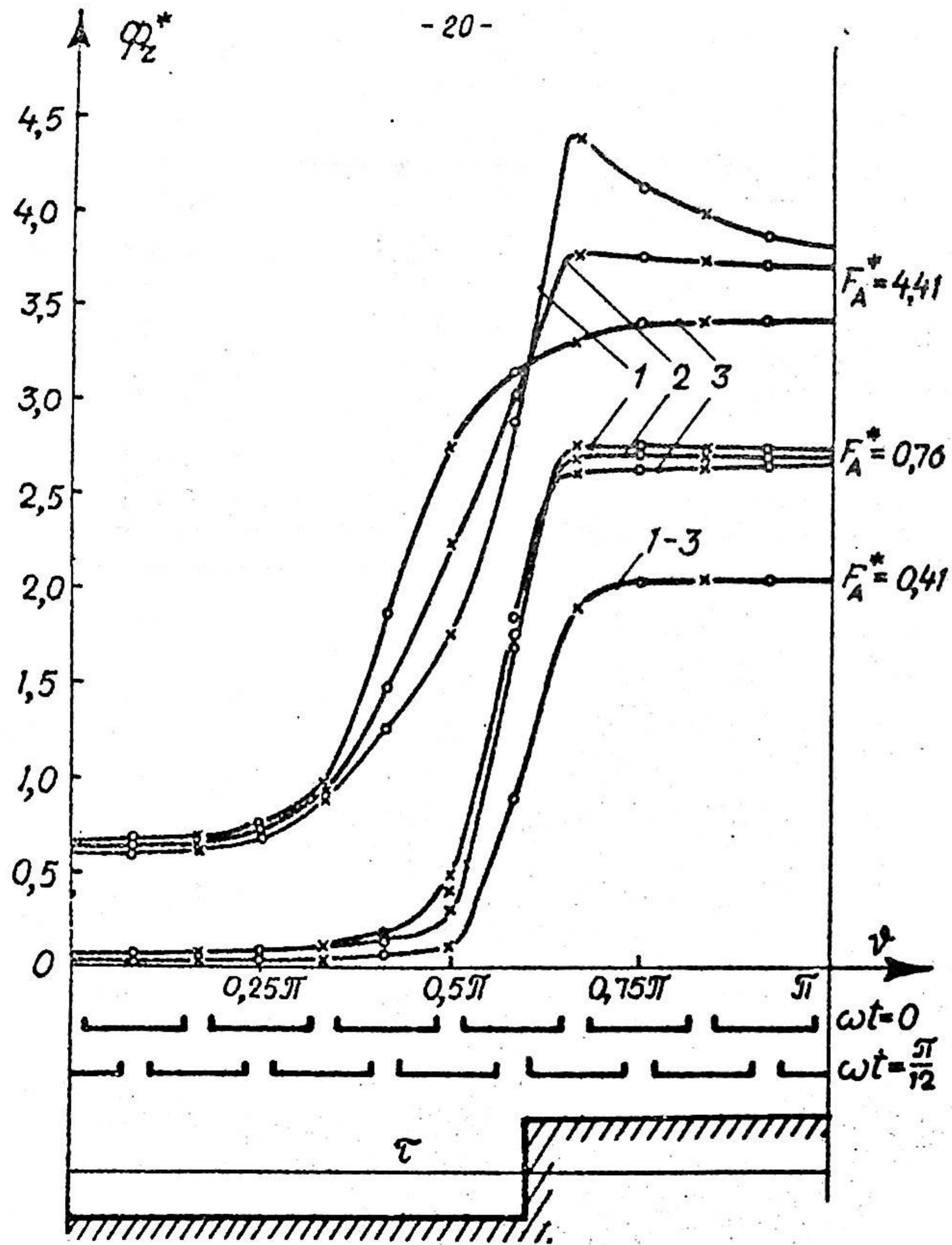


Рис. 2

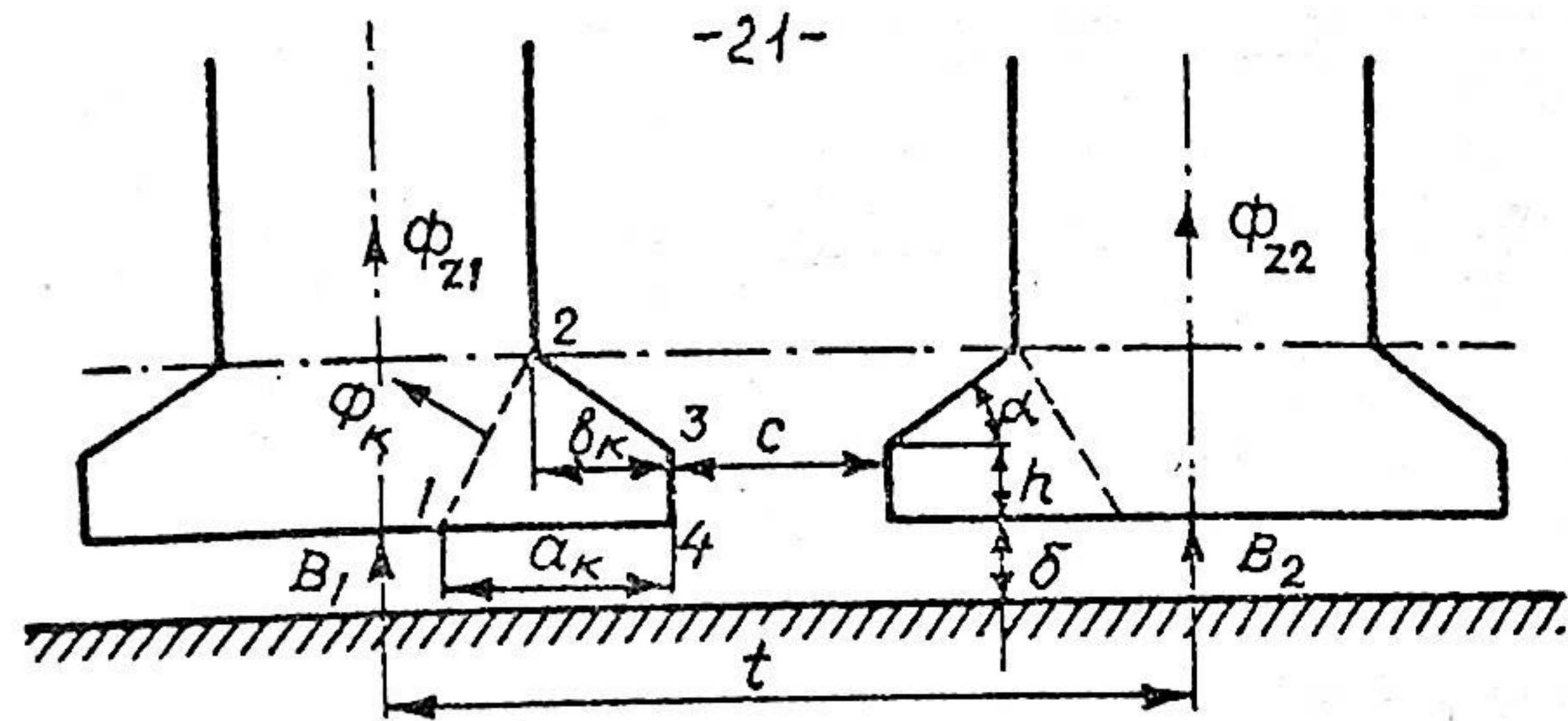


Рис. 3

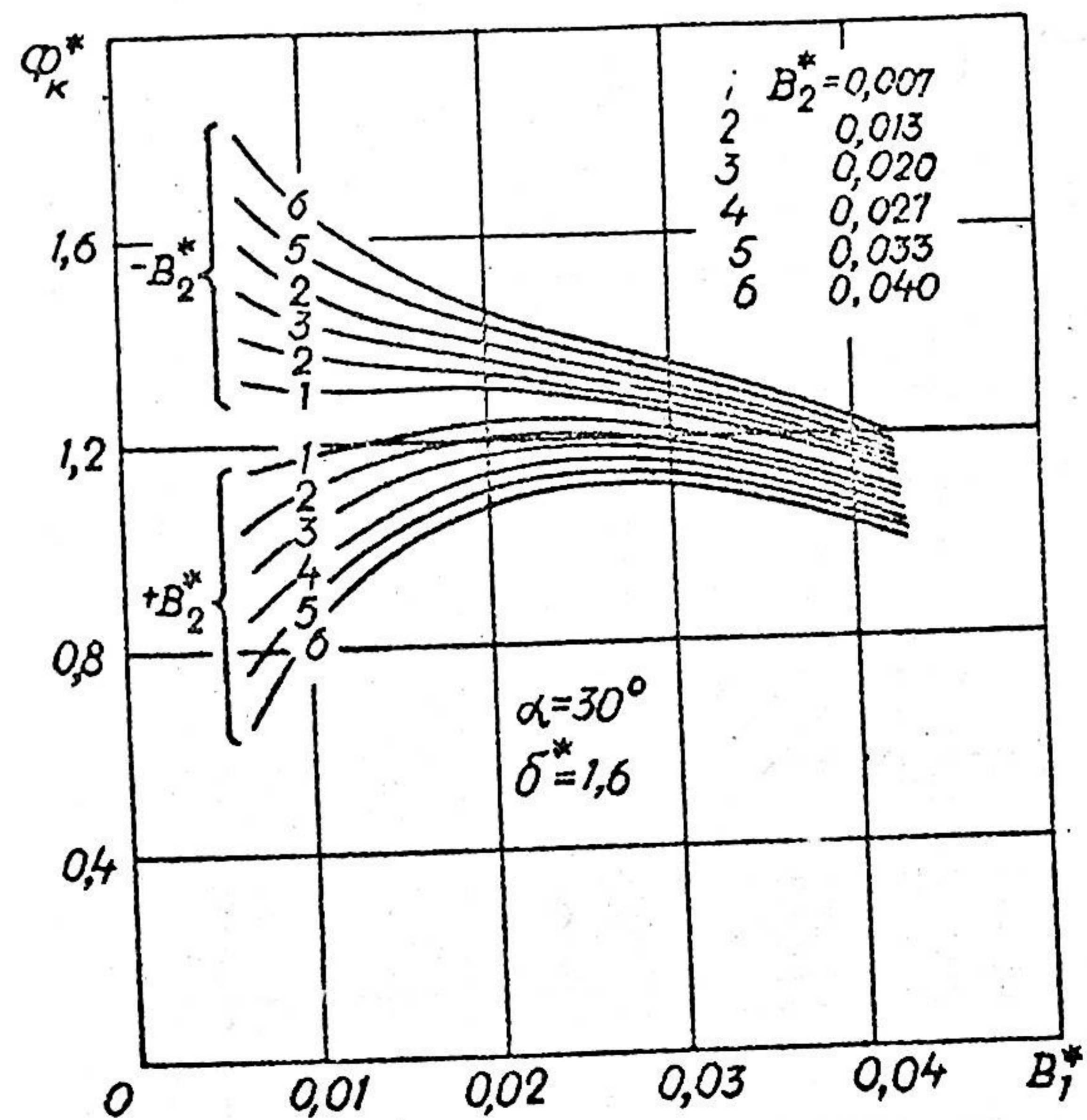
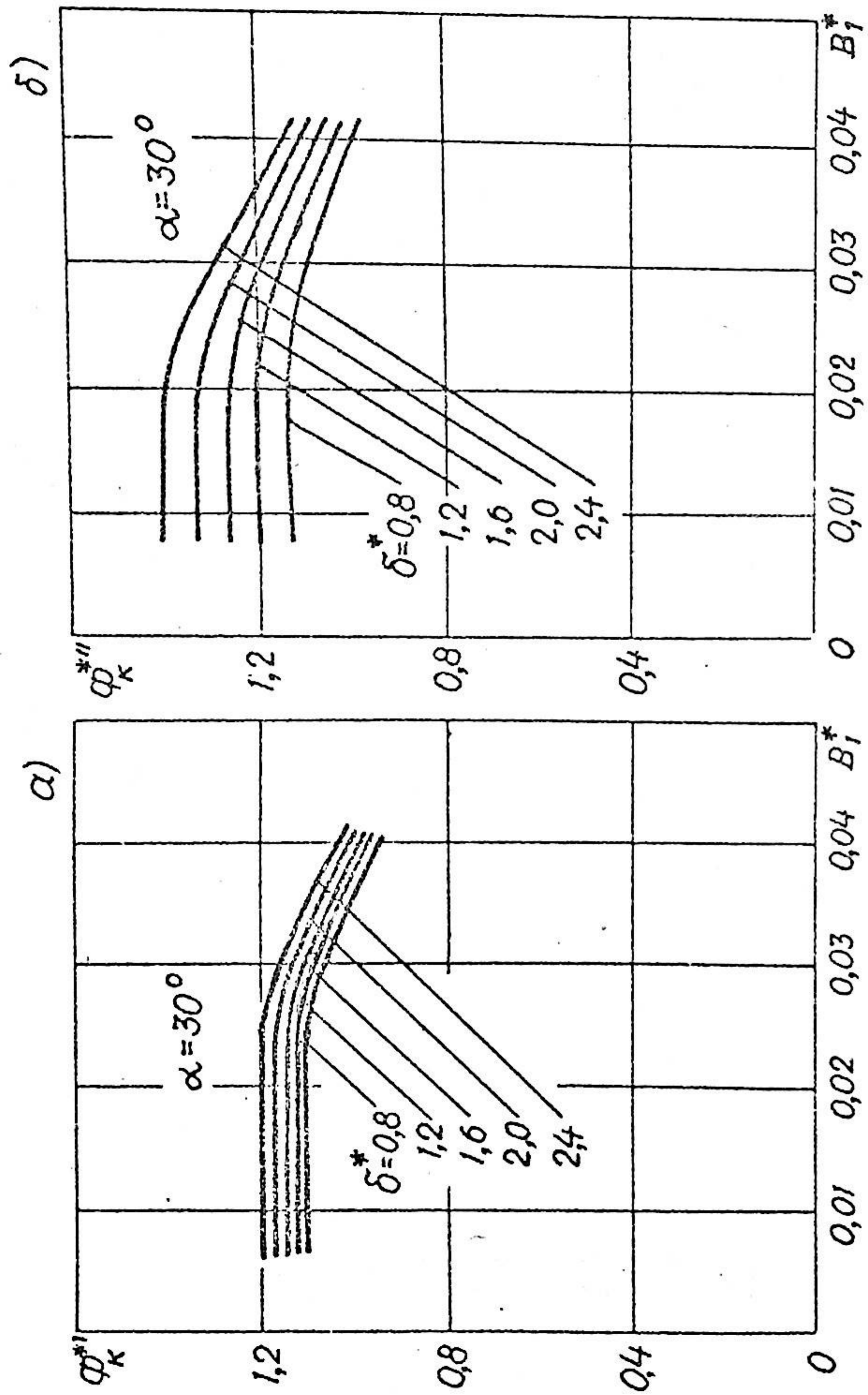
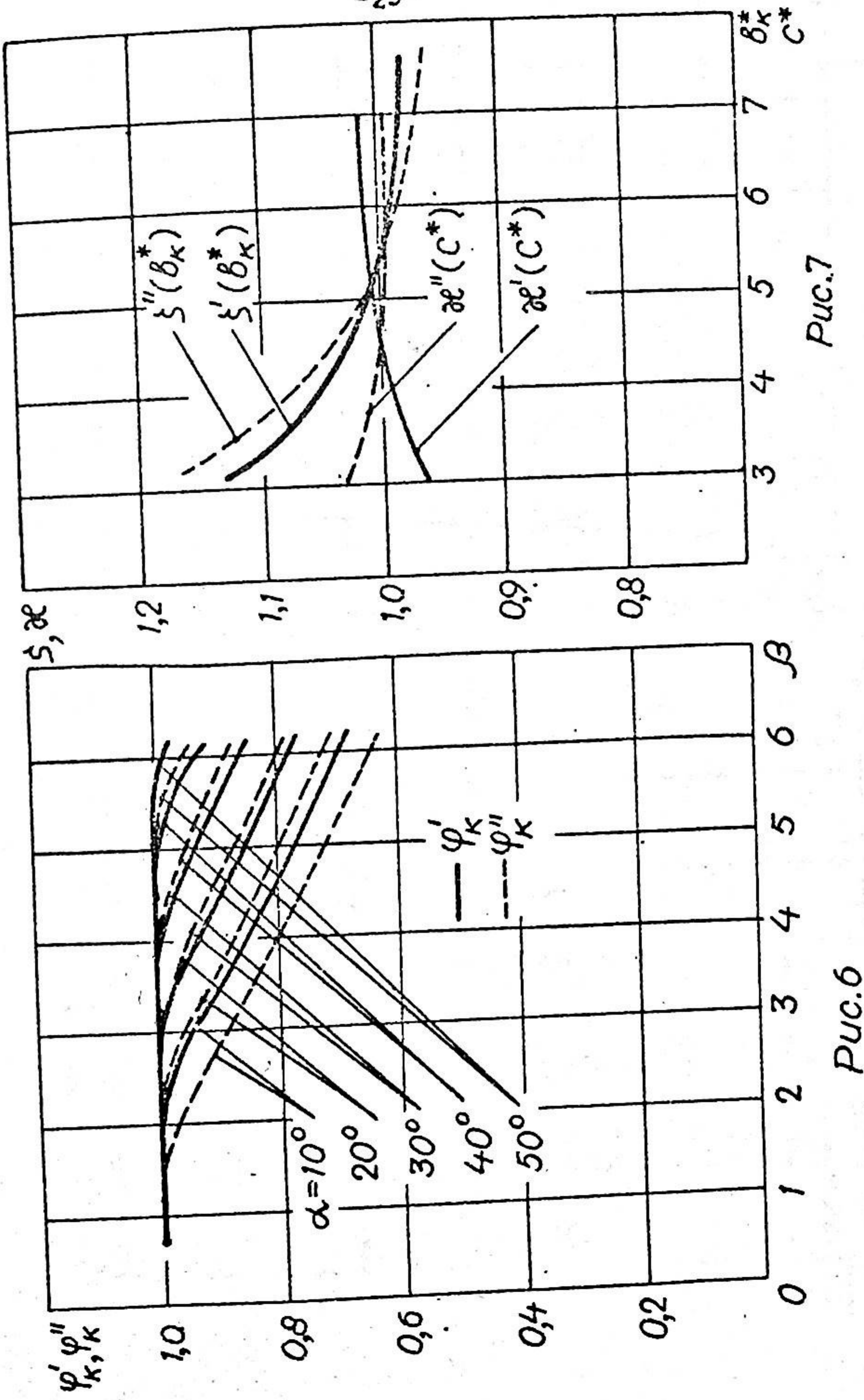


Рис. 4



Puc.5



Puc.6

Puc.7

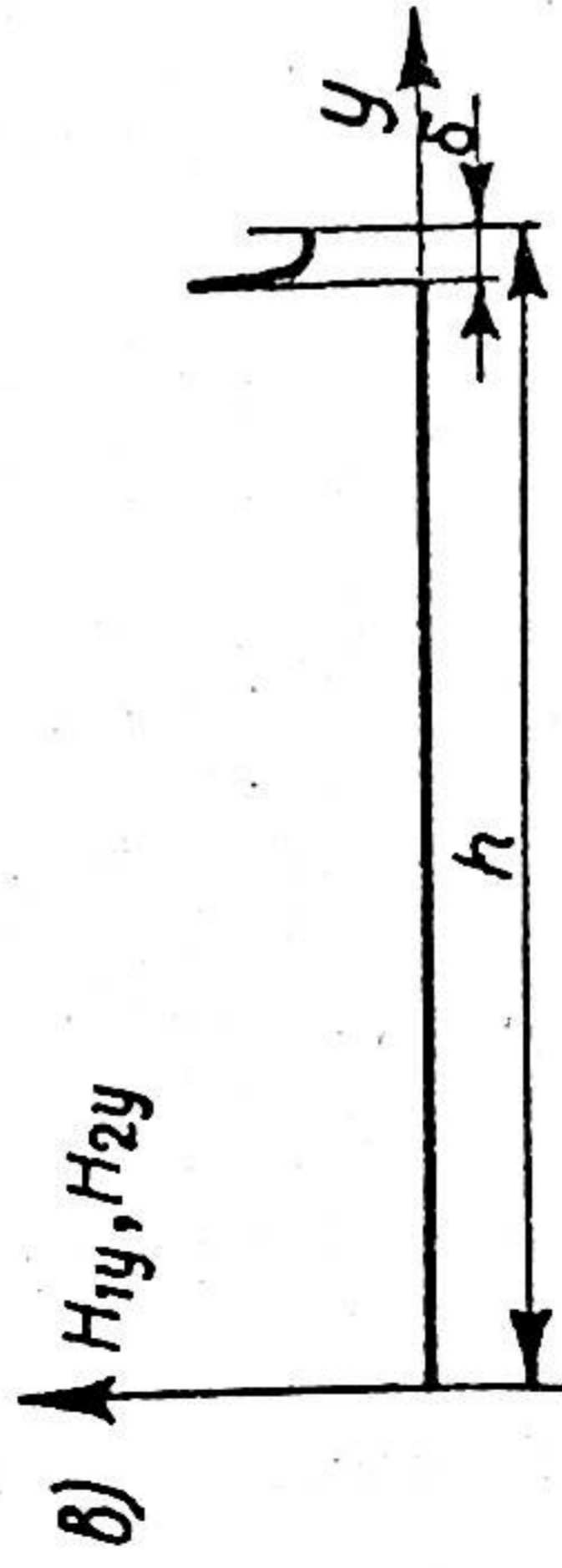
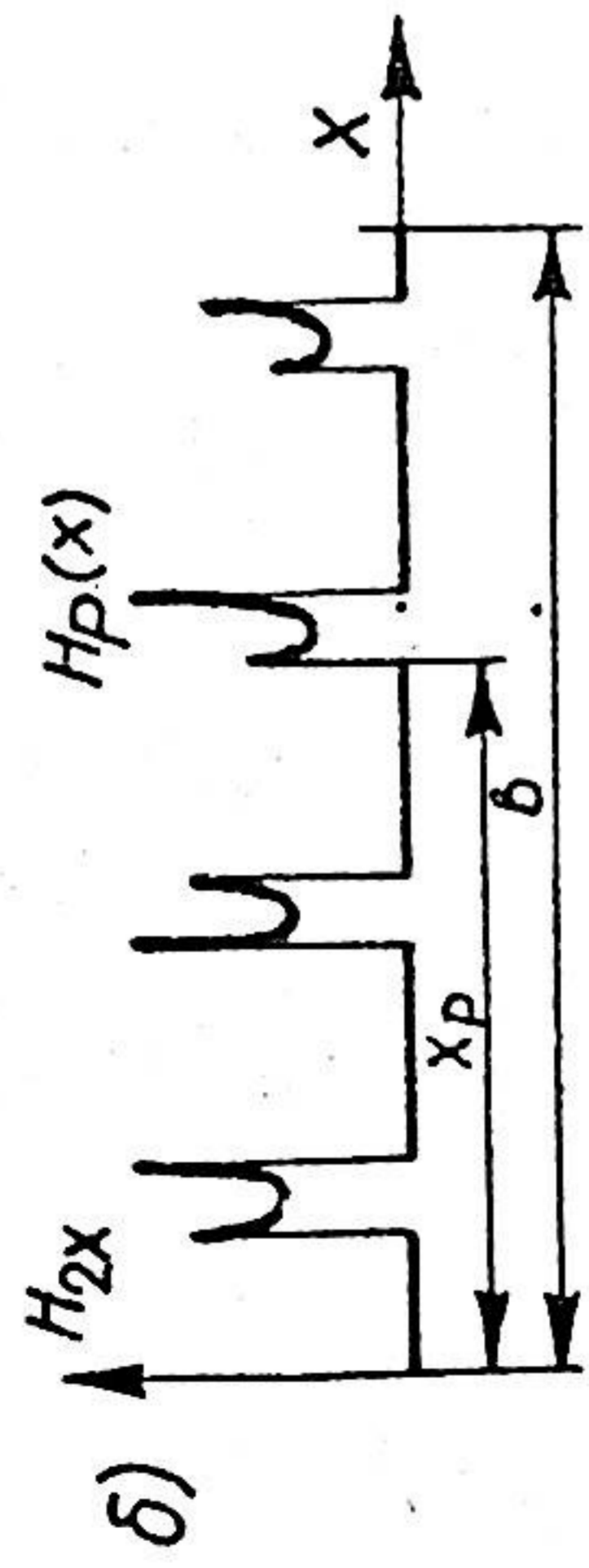
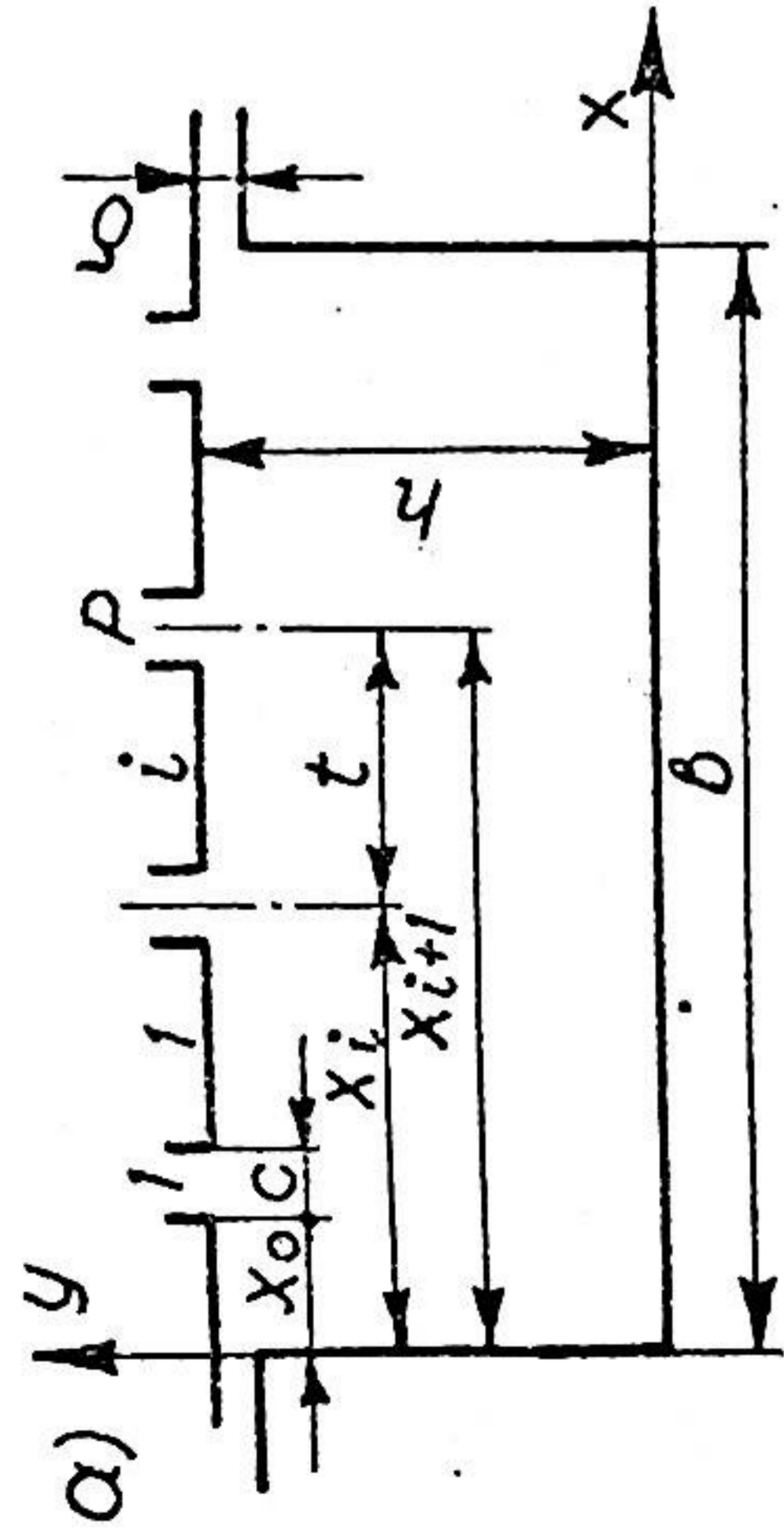


Рис.8

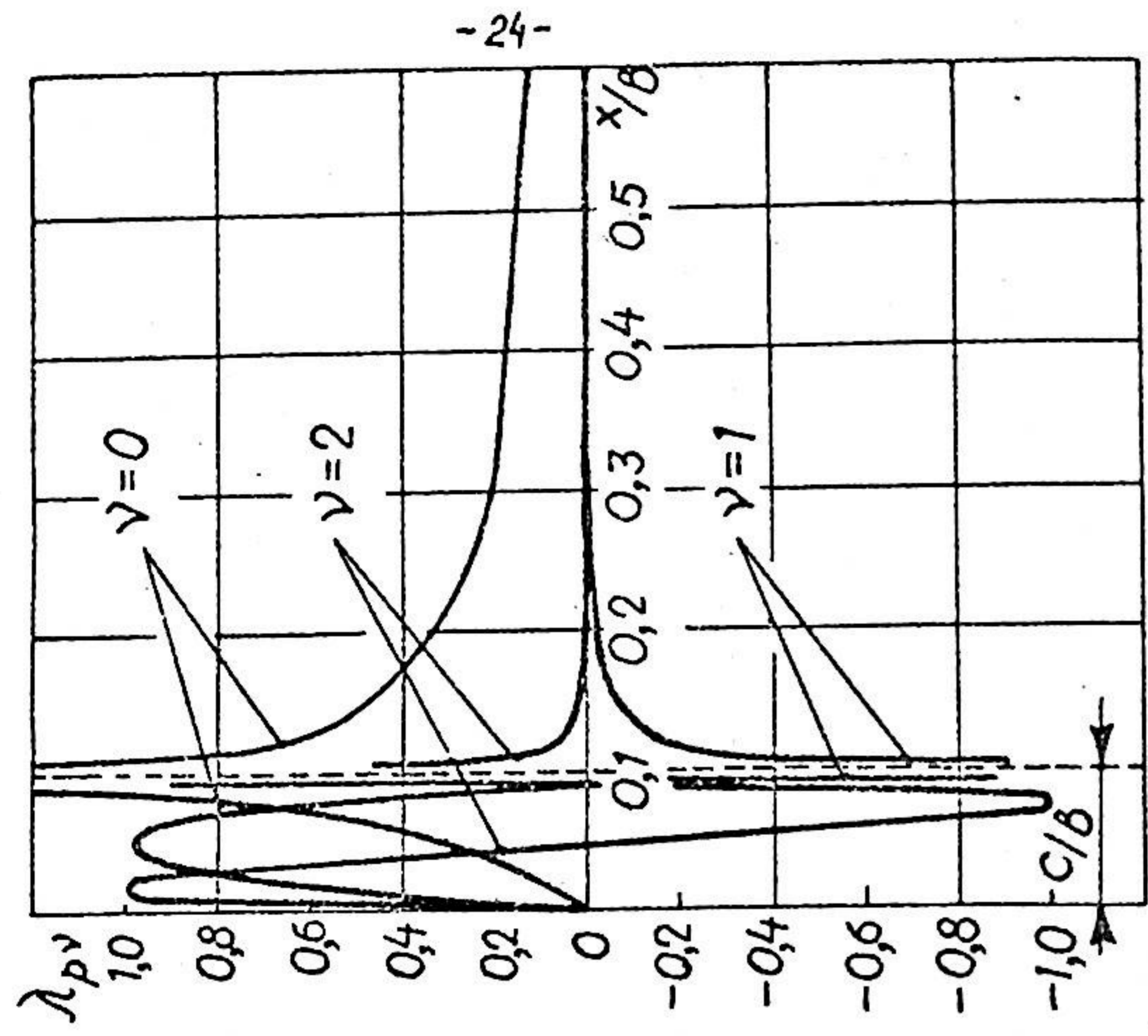


Рис.9

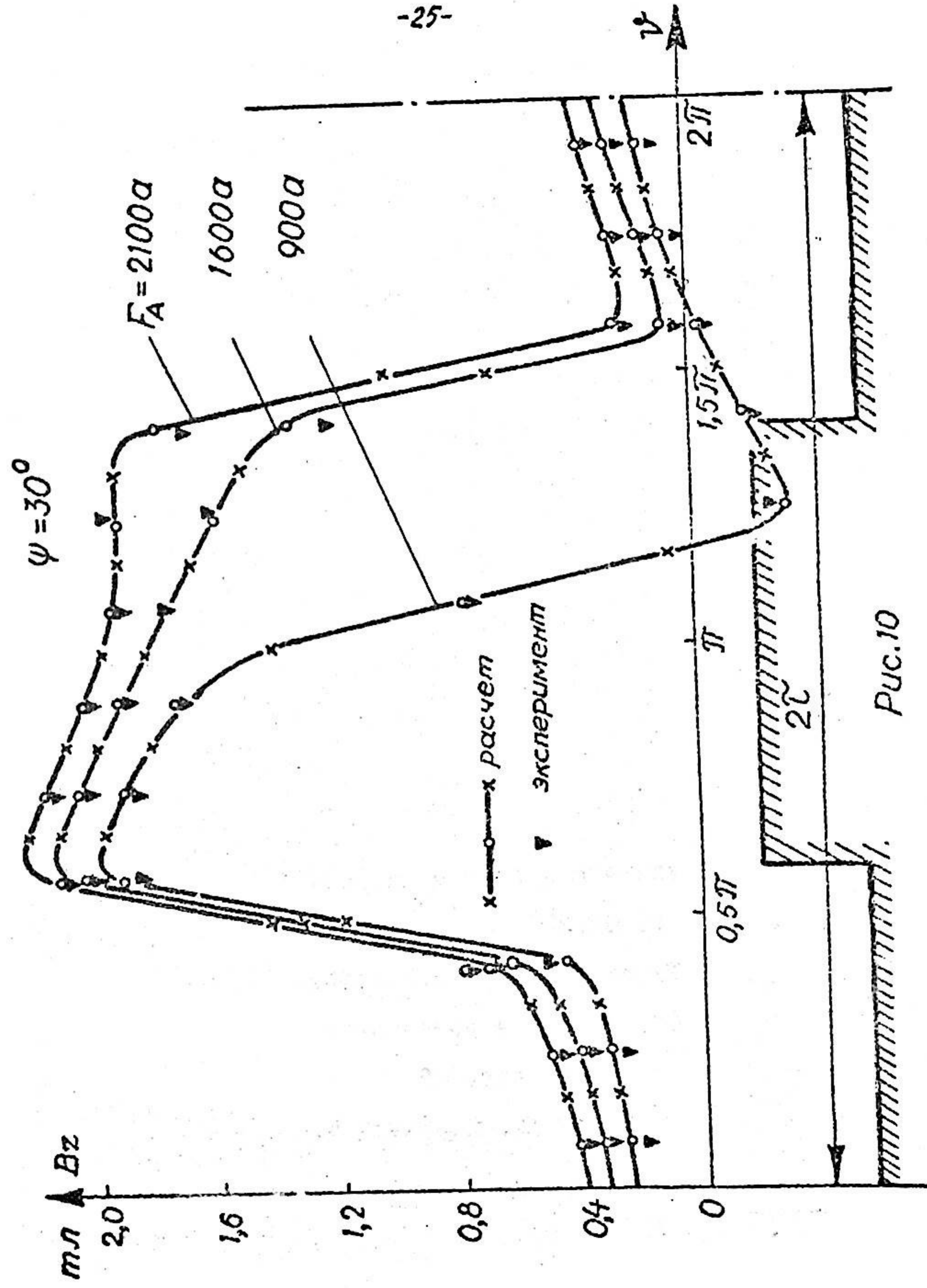


Рис.10

Подписано к печати 24.9.74 г.

ЯТ 02120, заказ № 171.

Тираж 200 экз. Бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере

ФБ АН Латв.ССР

г.Рига, ул. Комунала 4.