И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

47

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 78

Б.З.Персов

РАСЧЕТ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВАКУУМНЫХ КАМЕР

Новосибирск
1976

РАСЧЕТ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВАКУУМНЫХ КАМЕР

Б.З.Персов

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена задача расчета деформаций и напряжений в прямоугольных вакуумных камерах. Изложена методика расчета и приведены выражения для определения деформаций и напряжений в характерных точках поперечного сечения камеры. Рассмотрена возможность приближенного расчета камер с оценкой допускаемой погрешности. С целью сокращения времени при практическом расчете приведены графики для определения деформаций и напряжений в камере.

Вакуумные камеры некруглого сечения являются типичным элементом конструкции различных электрофизических установок, в том числе и ускорителей заряженных частиц. Их расчету посвящены, в частности, работы /1/,/2/,/3/ , первая из которых содержит анализ напряжений в материале камер эллиптической и квазиэллиптической формы, а вторая и третья касаются расчета напряжений и деформаций в камерах овальной формы и в камерах квадрупольных линз.

В данной работе рассматривается расчет напряжений и деформаций в характерных точках поперечного сечения прямоугольных вакуумных камер.

Рассматриваемая камера представляет собой конструкцию, поперечное сечение которой схематически представлено на рис.1, нагруженную равномерно распределенным по ее поверхности внешним давлением q . В общем случае стнки камеры могут иметь попарно различную толщину и быть изготовлены из различных материалов.

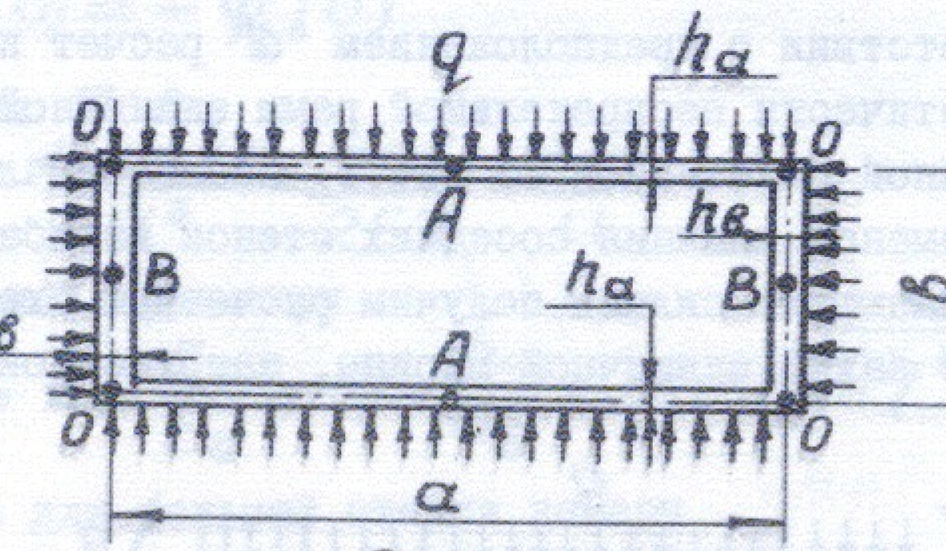


Рис.1

В нагруженном состоянии деформации стенок должны находиться в заранее заданных пределах, а напряжения в материале стенок не должны превышать допустимых значений для данных материалов. Определение этих деформаций и напряжений в характерных точках поперечного сечения камеры и является целью настоящего расчета.

Расчет ведется при следующих предположениях:

а) камера представляет собой тонкостенную оболочку, для которой выполняются условия /4/:

$$a \geq 5h_a \,;\; в \geq 5h_в$$

б) камера является длинной оболочкой, т.е. выполняется соотношение: $L \geq 2a$

где L – длина камеры в направлении ее оси.

В этом случае напряженное состояние вдали от закрепленных торцов камеры практически не зависит от условий закрепления /4/, и камера может рассчитываться как не закрепленная на торцах. Для камер с $L < 2a$ приводимая методика дает повышенный запас прочности.

в) в процессе деформирования в местах соединения стенок камеры обе смежные стенки имеют одинаковые по величине угловые деформации (различающиеся, естественно, по знаку).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с предположением "б" расчет камеры сводится к расчету статически неопределимой рамы единичной ширины с формой, аналогичной показанной на рис.I. После расчленения рамы на элементы с заменой влияния соседних стенок изгибающими моментами и осевыми сжимающими силами получим расчетную схему для каждой стенки в виде балки единичной ширины, нагруженной в соответствии с рис.2.

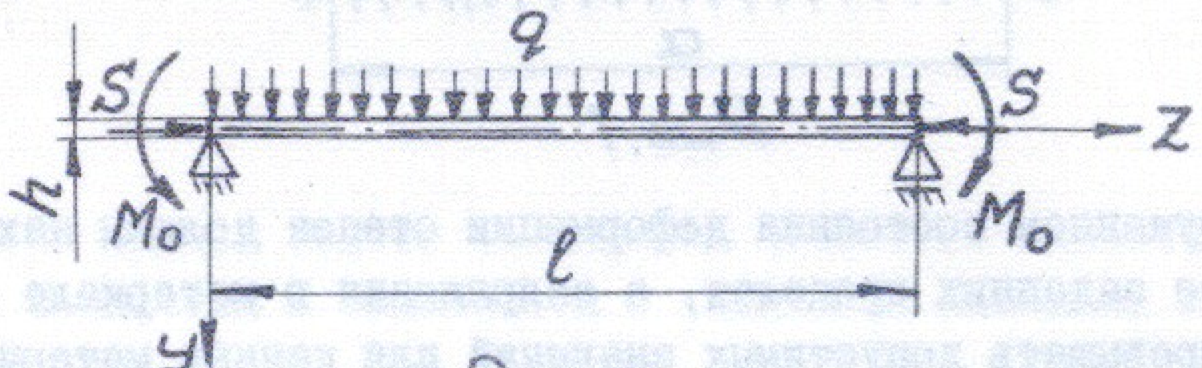


Рис.2

Уравнение упругой линии такой балки имеет вид /5/ :

$$y(z)=\frac{q\ell^4}{16EJu^4}\left[\frac{\cos u\left(1-\frac{2z}{\ell}\right)}{\cos u}-1\right]-\frac{q\ell^2}{8EJu^2}z(\ell-z)-$$

$$-\frac{M_o}{S}\left[\frac{\sin\alpha(\ell-z)}{\sin\alpha\ell}-\frac{\ell-z}{\ell}\right]-\frac{M_o}{S}\left(\frac{\sin\alpha z}{\sin\alpha\ell}-\frac{z}{\ell}\right) \qquad (I)$$

где, кроме известных обозначений,

E – модуль упругости материала, кг/см^2,

J – момент инерции сечения балки прямоугольного сечения единичной ширины, см^4;

$$\alpha=\sqrt{\frac{S}{EJ}}\ ;\quad u=\frac{\alpha\ell}{2}$$

Дифференцируя, получаем выражение для угла поворота сечения балки:

$$\varphi(z)=\frac{d}{dz}[y(z)]=\frac{q\ell^3}{8EJu^3}\cdot\frac{\sin u\left(1-\frac{2z}{\ell}\right)}{\cos u}-\frac{q\ell^2}{8EJu^2}(\ell-2z)-$$

$$-\frac{M_o\ell}{2EJu}\cdot\frac{\cos\alpha z-\cos\alpha(\ell-z)}{\sin\alpha\ell} \qquad (2)$$

В выражения (I) и (2) входит неизвестный изгибающий момент M_o, который может быть определен из предположения "в":

$$\varphi_a(0)=-\varphi_b(0) \qquad (3)$$

Согласно (2) при $z=0$

$$\varphi(0)=\frac{q\ell^3}{8EJ}\cdot\frac{\operatorname{tg}u-u}{u^3}-\frac{M_o\ell}{2EJ}\cdot\frac{\operatorname{tg}u}{u}$$

Вводя безразмерные параметры

$$\beta=\frac{b}{a},\quad \varepsilon=\frac{E_a}{E_b},\quad \eta=\frac{h_a}{h_b},\quad \text{æ}=\sqrt{\beta\varepsilon\eta^3}$$

и учитывая, что для большей стенки камеры

$$u_a=\frac{\alpha_a a}{2}=\sqrt{\frac{S_a}{E_aJ_a}}\cdot\frac{a}{2}=\frac{a}{2}\sqrt{\frac{qa\beta}{2E_aJ_a}},$$

а для меньшей

$$u_b=\frac{\alpha_b b}{2}=\frac{b}{2}\sqrt{\frac{S_b}{E_bJ_b}}=\frac{a}{2}\sqrt{\frac{qa\beta\cdot\beta\varepsilon\eta^3}{2E_aJ_a}}=\text{æ}u_a,$$

получим выражения для углов поворота стенок камеры в месте их соединения

$$\varphi_a(0)=\frac{qa^3}{8E_aJ_a}\cdot\frac{\operatorname{tg}u_a-u_a}{u_a^3}-\frac{M_oa}{2E_aJ_a}\cdot\frac{\operatorname{tg}u_a}{u_a}$$

$$\varphi_b(0)=\frac{qa^3}{8E_aJ_a}\cdot\frac{\beta^2}{\text{æ}}\cdot\frac{\operatorname{tg}\text{æ}u_a-\text{æ}u_a}{u_a^3}-\frac{M_oa}{2E_aJ_a}\text{æ}\frac{\operatorname{tg}\text{æ}u_a}{u_a}$$

Используя соотношение (3), получаем значение изгибающего момента в месте соединения стенок камеры:

$$\left.\begin{aligned} &M_o = qa^2 \cdot K_M \\ &\text{где } K_M = \frac{tgU_a - U_a + \frac{\beta^2}{\varkappa}(tg\varkappa U_a - \varkappa U_a)}{4U_a^2(\varkappa tg\varkappa U_a + tgU_a)} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Выразив через параметры стенок камеры сжимающую силу S

$$S = \alpha^2 EJ = \frac{4u^2}{\ell^2} EJ ,$$

что для стенок камеры дает

$$S_a = \frac{4U_a^2}{a^2} E_a J_a$$

$$S_в = \frac{4U_в^2}{в^2} E_в J_в = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{4U_a^2}{a^2} E_a J_a ,$$

и используя выражения (I), (4) и приведенные выше безразмерные параметры, можно получить соотношения для деформаций камеры в точках А и В (рис.I):

$$\left.\begin{aligned} &W_A = \frac{qa^4}{E_a h_a^3} \cdot K_{WA} , \\ &\text{где } K_{WA} = \frac{3}{4U_a^2}\left[\left(\frac{1}{\cos U_a} - 1\right)\left(\frac{1}{U_a^2} - 4K_M\right) - \frac{1}{2}\right] \\ &W_B = \frac{qa^4}{E_в h_в^3} \cdot K_{WB} , \\ &\text{где } K_{WB} = \frac{3\beta^2}{4\varkappa^2 U_a^2}\left[\left(\frac{1}{\cos\varkappa U_a} - 1\right)\left(\frac{\beta^2}{\varkappa^2 U_a^2} - 4K_M\right) - \frac{\beta^2}{2}\right] \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Наибольшее напряжение в балке, подверженной продольно-поперечному изгибу, определяется выражением /6/ :

$$|\sigma|_{max} = \frac{S}{F} + \frac{M_{max}}{W}$$

где F и W – соответственно площадь и момент сопротивления сечения балки. Для балки единичной ширины, нагруженной в соответствии с рис.2, это выражение приобретает вид:

$$|\sigma|_{max} = \frac{S}{h} + \frac{6M_{max}}{h^2}$$

Для места соединения стенок камеры это выражение дает

$$\left.\begin{aligned} &|\sigma|_{o\,max} = \frac{S}{h} + \frac{6M_o}{h^2} \\ &\text{или, для большей стенки} \\ &|\sigma|_{oa} = \frac{qa^2}{h_a^2} \cdot K_{\sigma oa} , \text{ где } K_{\sigma oa} = \frac{\beta h_a}{2a} + 6K_M \\ &\text{а для меньшей стенки} \\ &|\sigma|_{oв} = \frac{qa^2}{h_в^2} \cdot K_{\sigma oв} , \text{ где } K_{\sigma oв} = \frac{h_a}{2a\eta} + 6K_M \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Для точек А и В – середин сторон сечения камеры – выражения для изгибающего момента будут иметь вид:

$$M_A = M_A^q - M_o + S_a \cdot W_A = qa^2\left(\frac{1}{8} - K_M + \frac{qa^3\beta}{2E_a h_a^3} \cdot K_{WA}\right)$$

$$M_B = M_B^q - M_o + S_в \cdot W_B = qa^2\left(\frac{\beta^2}{8} - K_M + \frac{qa^3}{2E_в h_в^3} \cdot K_{WB}\right) ,$$

откуда для наибольших напряжений в этих точках получаются выражения:

$$\left.\begin{aligned} &|\sigma|_A = \frac{qa^2}{h_a^2} \cdot K_{\sigma A} , \text{ где } K_{\sigma A} = \frac{\beta h_a}{2a} + 3\left(\frac{1}{4} - 2K_M + \frac{qa^3\beta}{E_a h_a^3} K_{WA}\right) \\ &|\sigma|_B = \frac{qa^2}{h_в^2} \cdot K_{\sigma B} , \text{ где } K_{\sigma B} = \frac{h_a}{2a\eta} + 3\left(\frac{\beta^2}{4} - 2K_M + \frac{qa^3}{E_в h_в^3} K_{WB}\right) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Выражения (4), (5), (6) и (7) позволяют определить деформации и напряжения в характерных точках поперечного сечения прямоугольной вакуумной камеры. Положительными при этом получаются прогибы, направленные внутрь камеры, и напряжения, соответствующие растяжению внутренних волокон стенок камеры.

О ПРАКТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ КАМЕР

Выражения (4) ÷ (7) дают точные значения искомых деформаций и напряжений. Однако практически расчет по ним является достаточно громоздким и требует значительных затрат времени в связи с необходимостью точного определения u_a, $\varkappa u_a$, $tg\,u_a$, $tg\,\varkappa u_a$, $\cos u_a$ и $\cos\varkappa u_a$. В то же время напряженное состояние балки, нагруженной поперечной нагрузкой и осевой сжимающей силой, с достаточной точностью описывается приближенной зависимостью /7/:

$$N=\frac{\bar{N}}{1-\frac{S}{P_{кр}}} \tag{8}$$

где N – усилие (перемещение) от совместного действия поперечной и осевой нагрузок;

$\bar{N}$ – соответствующее усилие (перемещение) от действия только поперечной нагрузки;

S – сжимающая осевая сила;

$P_{кр}$ – критическая сжимающая сила для данной балки.

Естественно, чем меньше величина $S/P_{кр}$, тем ближе значения N и $\bar{N}$. При небольших значениях $S/P_{кр}$ оказывается возможным вести расчет без учета сжимающей силы (т.е. считать $N=\bar{N}$) и ошибка в результате такого расчета будет порядка $S/P_{кр}$. Оценим эту величину для прямоугольной вакуумной камеры.

Наихудший случай с точки зрения устойчивости стенки, который может иметь место в рассматриваемой камере, соответствует шарнирному закреплению краев. В этом случае критическая сила равна /7/ (при единичной ширине):

$$P_{кр}=\frac{\pi^2 EJ}{\ell^2}=\frac{\pi^2 Eh^3}{12\ell^2}$$

где ℓ – длина балки

h – высота сечения балки (для камеры – толщина стенки)

E – модуль упругости материала.

Для большей стенки камеры это выражение принимает вид:

$$P_{кр\,a}=\frac{\pi^2 E_a h_a^3}{12a^2}$$

Сжимающая сила для этой стенки:

$$S_a=\frac{qa\beta}{2}$$

и искомое соотношение

$$\frac{S_a}{P_{кр\,a}}=\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=\frac{6q\beta}{\pi^2 E_a}\left(\frac{a}{h_a}\right)^3 \tag{9}$$

Величина a/h_a, входящая в полученное выражение, должна быть ограничена, во всяком случае, условием прочности при действии поперечной нагрузки q. Для балки единичной ширины с шарнирными опорами это условие имеет вид:

$$\sigma=\frac{6M_{max}}{h^2}=\frac{6}{h^2}\cdot\frac{q\ell^2}{8}=\frac{3q}{4}\left(\frac{\ell}{h}\right)^2\leq\frac{\sigma_T}{n}$$

где σ_T – предел текучести материала, кг/см^2

n – требуемый запас прочности.

Записав полученные выражения для большей стенки камеры, получим наибольшее допустимое отношение длины стенки к ее толщине:

$$\left(\frac{a}{h_a}\right)_{max}=\sqrt{\frac{4\sigma_T}{3qn}}$$

Подставляя полученное соотношение в выражение (9), получим:

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=\frac{6q\beta}{\pi^2 E_a}\left(\frac{4\sigma_T}{3qn}\right)^{3/2}=0{,}935\frac{q\beta}{E_a}\left(\frac{\sigma_T}{qn}\right)^{3/2} \tag{10}$$

или, отметив, что $\sigma_T/n=\sigma$ — есть фактическое напряжение в стенке камеры,

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=0{,}935\frac{q\beta}{E_a}\left(\frac{\sigma}{q}\right)^{3/2} \tag{10'}$$

Для основных видов конструкционных материалов эта величина составит (при q =1 кг/см^2 и $\beta=\beta_{max}=1$):

сталь Х18Н9Т (E=2,1.10^6 кг/см^2, σ_T=2000 кг/см^2):

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=\frac{0{,}935\cdot 1\cdot 1}{2{,}1\cdot 10^6}\left(\frac{2000}{1\cdot n}\right)^{3/2}=\frac{0{,}04}{n^{3/2}}$$

медь М1 (E=1,12.10^6 кг/см^2, σ_T=700 кг/см^2):

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=\frac{0{,}935\cdot 1\cdot 1}{1{,}12\cdot 10^6}\left(\frac{700}{1\cdot n}\right)^{3/2}=\frac{0{,}0155}{n^{3/2}}$$

алюминиевый сплав Д16 ($E=0,7.10^6$ кг/см^2, σ_T =1000 кг/см^2):

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a=\frac{0,935\cdot 1\cdot 1}{0,7\cdot 10^6}\left(\frac{1000}{1\cdot n}\right)^{3/2}=\frac{0,0424}{n^{3/2}}$$

Таким образом, даже при запасе прочности n =1 погрешность при расчете большей стенки камеры без учета сжимающей силы не превышает 4÷5%.

Несколько хуже обстоит дело с меньшей стенкой камеры. Для нее аналогичные вычисления дают соотношение:

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_в=0,935\frac{q}{\beta E_в}\left(\frac{\sigma_T}{qn}\right)^{3/2} \qquad (11)$$

или, через фактическое напряжение σ :

$$\left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_в=0,935\frac{q}{\beta E_в}\left(\frac{\sigma}{q}\right)^{3/2} \qquad (11')$$

т.е. погрешность растет с уменьшением β. Однако можно видеть, что соответствующим подбором величины "$\beta n^{3/2}$" можно и здесь свести погрешность к приемлемым величинам. Так, при $\beta \geqslant 0,2$ и $n \geqslant 1,65$ погрешность не превышает $\sim 10\%$.

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Можно вести приближенный расчет вакуумных прямоугольных камер без учета действия сжимающих стенки сил; при этом величина ошибки может быть оценена по выражениям (10') и (11').

2. Для большей стенки камеры практически во всех случаях погрешность расчета без учета сжимающей силы не превышает величины 5%, для меньшей стенки - величины 10% при $\beta n^{3/2} \geqslant 0,424$ ($\beta n^{3/2}$ =0,424, в частности, при β =0,2 и n =1,65).

3. Для камер с $\beta < 0,2$ при необходимости иметь малые запасы прочности следует вести расчет по точным формулам (4) ÷ (7).

РАСЧЕТ БЕЗ УЧЕТА СЖИМАЮЩИХ СИЛ

Для случая стенок камеры, нагруженных только поперечной нагрузкой, использованная ранее методика расчета дает следующие

результаты:

$$M_o=qa^2\cdot K_M,\ где\ K_M=\frac{1}{12}\cdot\frac{1+\beta^3\varepsilon\eta^3}{1+\beta\varepsilon\eta^3} \qquad (12)$$

$$\left.\begin{aligned} W_A&=\frac{qa^4}{E_a h_a^3}\cdot K_{WA},\ где\ K_{WA}=\frac{5}{32}-\frac{3}{2}K_M \\ W_B&=\frac{qa^4}{E_в h_в^3}\cdot K_{WB},\ где\ K_{WB}=\beta^2\left(\frac{5}{32}\beta^2-\frac{3}{2}K_M\right)\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

$$\left.\begin{aligned} &\sigma_{oa}=\frac{qa^2}{h_a^2}\cdot K_{\sigma o};\quad \sigma_{oв}=\frac{qa^2}{h_в^2}\cdot K_{\sigma o}, \\ &где\ K_{\sigma o}=6K_M\end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

$$\left.\begin{aligned} \sigma_A&=\frac{qa^2}{h_a^2}\cdot K_{\sigma A},\ где\ K_{\sigma A}=\frac{3}{4}-6K_M \\ \sigma_B&=\frac{qa^2}{h_a^2}\cdot K_{\sigma B},\ где\ K_{\sigma B}=\frac{3}{4}\beta^2-6K_M\end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

При расчете по выражениям (13) ÷ (15) положительными получаются деформации, направленные внутрь камеры, и напряжения, соответствующие растяжению внутреннего по отношению к камере волокна стенки.

Для большего удобства и сокращения времени при расчете для случая ε =1 ($E_a=E_B$) коэффициенты $K_{WA}, K_{WB}, K_{\sigma o}, K_{\sigma A}$ и $K_{\sigma B}$ представлены на рис 4÷8 в виде кривых в зависимости от параметров β и η.

После расчета по выражениям (12) ÷ (15) деформаций и напряжений следует оценить величины погрешностей для обеих стенок по формулам (10') и (11'). Если эти погрешности превышают допустимую величину, следует вести расчет по точным формулам (4) ÷ (7) с определением входящих в эти формулы величин U_a, $\varkappa U_a$, $tg U_a$, $tg \varkappa U_a$, $Cos U_a$ и $Cos \varkappa U_a$ с точностью до шести значащих цифр.

ПРИМЕР РАСЧЕТА КАМЕРЫ

Рассчитать прямоугольную вакуумную камеру, изображенную на рис.3 (р-ры в мм) с погрешностью не более 5% (материал - сталь XI8H9T; $E = 2{,}I.I0^6$ кг/см^2; $\sigma_T = 2000$ кг/см^2).

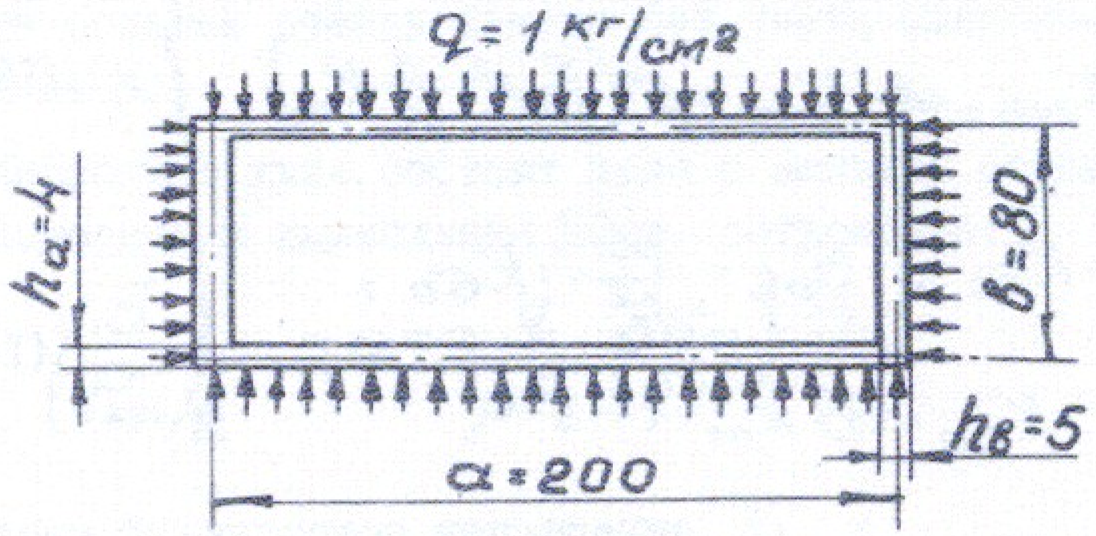


Рис.3

I. Определяются безразмерные параметры:

$$\beta = \frac{80}{200} = 0{,}4\ ;\quad \eta = \frac{4}{5} = 0{,}8;\quad \varepsilon = I$$ (вся камера из одного материала).

2. Рассчитываются величины в выражениях (I3) ÷ (I5):

$$\frac{qa^4}{E_a h_a^3} = \frac{I.20^4}{2{,}I.I0^6.0{,}4^3} = I{,}I9;\quad \frac{qa^4}{E_в h_в^3} = \frac{I.20^4}{2{,}I.I0^6.0{,}5^3} = 0{,}609$$

$$\frac{qa^2}{h_a^2} = \frac{I.20^2}{0{,}4^2} = 2500;\quad \frac{qa^2}{h_в^2} = \frac{I.20^2}{0{,}5^2} = I600$$

3. По графикам (рис.4 ÷ 8) определяются коэффициенты в выражениях (I3) ÷ (I5)

$K_{wA} = 0{,}049I$; $K_{wB} = -0{,}0I28$; $K_{\sigma o} = 0{,}427$

$K_{\sigma A} = 0{,}32I$; $K_{\sigma B} = -0{,}3$.

4. Рассчитываются деформации и напряжения в заданных точках сечения камеры по выражениям (I3) ÷ (I5):

а) прогиб в середине большей стороны:

$W_A = I{,}I9.0{,}049I = 0{,}0585$ см $= 0{,}585$ мм;

б) прогиб в середине меньшей стороны:

$W_в = 0{,}609.(-0{,}0I28) = -0{,}0078$ см $= -0{,}078$ мм;

в) напряжение изгиба в большей стенке в месте соединения стенок:

$\sigma_{oa} = 2500.0427 = I067{,}5$ кг/см$^2 < \sigma_T$

г) напряжение изгиба в меньшей стенке в месте соединения стенок:

$\sigma_{oв} = I600.0{,}427 = 683$ кг/см$^2 < \sigma_T$

д) напряжение изгиба в середине большей стенки:

$\sigma_A = 2500.0{,}32I = 802{,}5$ кг/см$^2 < \sigma_T$

е) напряжение изгиба в середине меньшей стенки:

$\sigma_в = I600.(-0{,}3) = -480$ кг/см$^2 < \sigma_T$

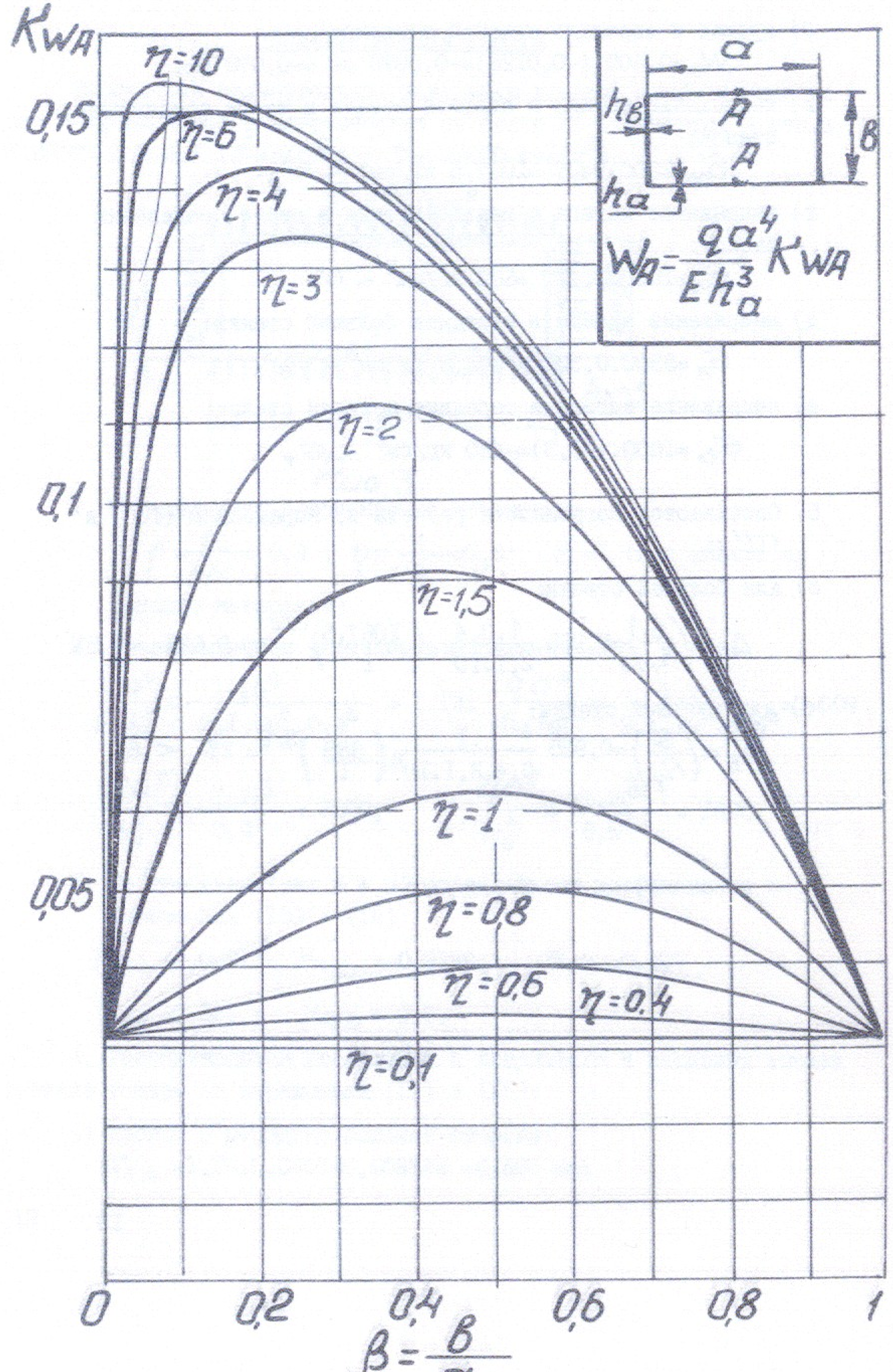
5. Оцениваются погрешности расчета по выражениям (I0′) и (II′):

а) для большей стенки:

$$\Delta_a = \left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_a = 0{,}935\ \frac{I.0{,}4}{2{,}I.I0^6}\left(\frac{I067{,}5}{I}\right)^{3/2} \approx 0{,}62\% < 5\%$$

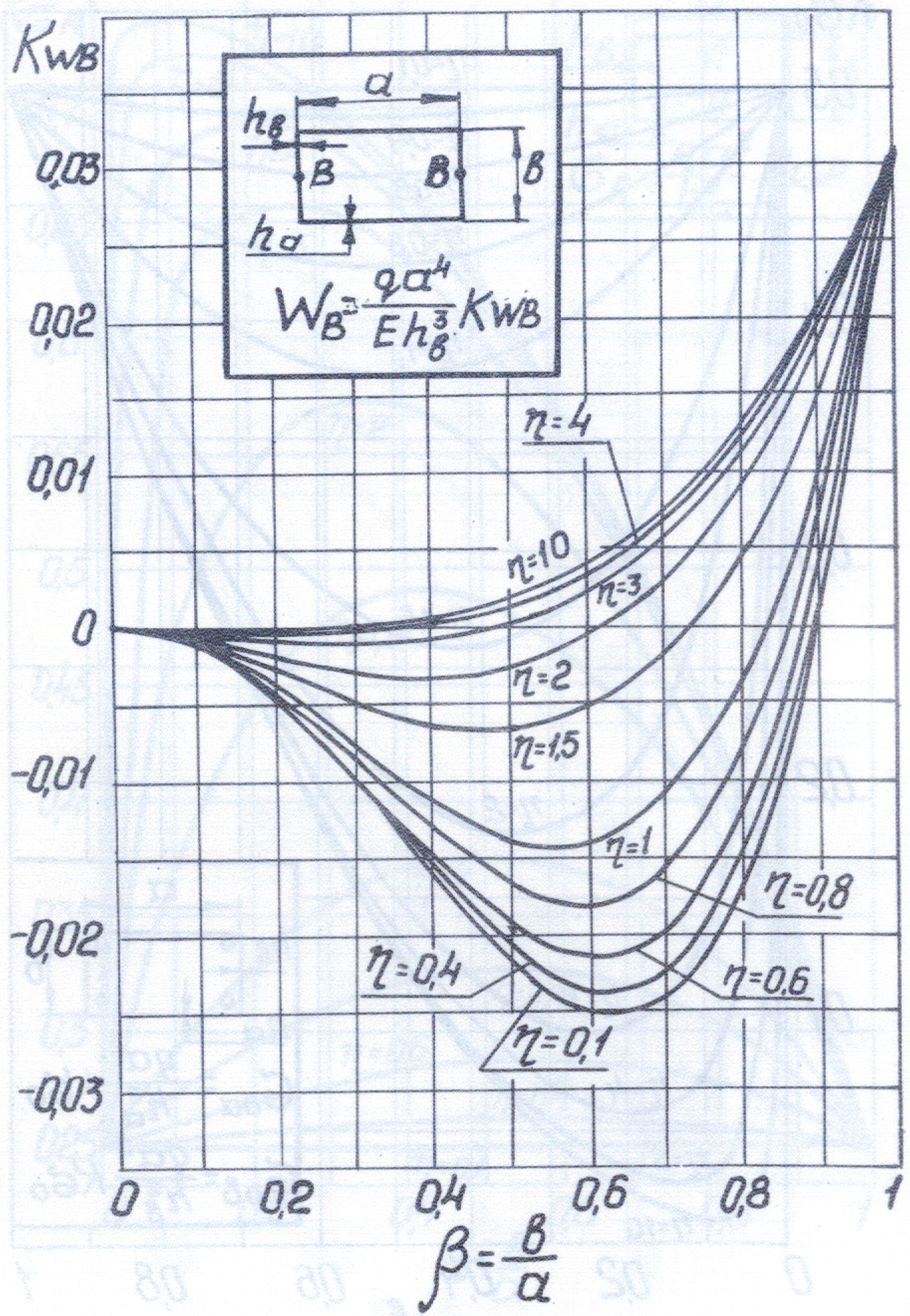
б) для меньшей стенки:

$$\Delta_в = \left(\frac{S}{P_{кр}}\right)_в = 0{,}935\ \frac{I}{0{,}4.2{,}I.I0^6}\left(\frac{683}{I}\right)^{3/2} = 2\% < 5\%$$



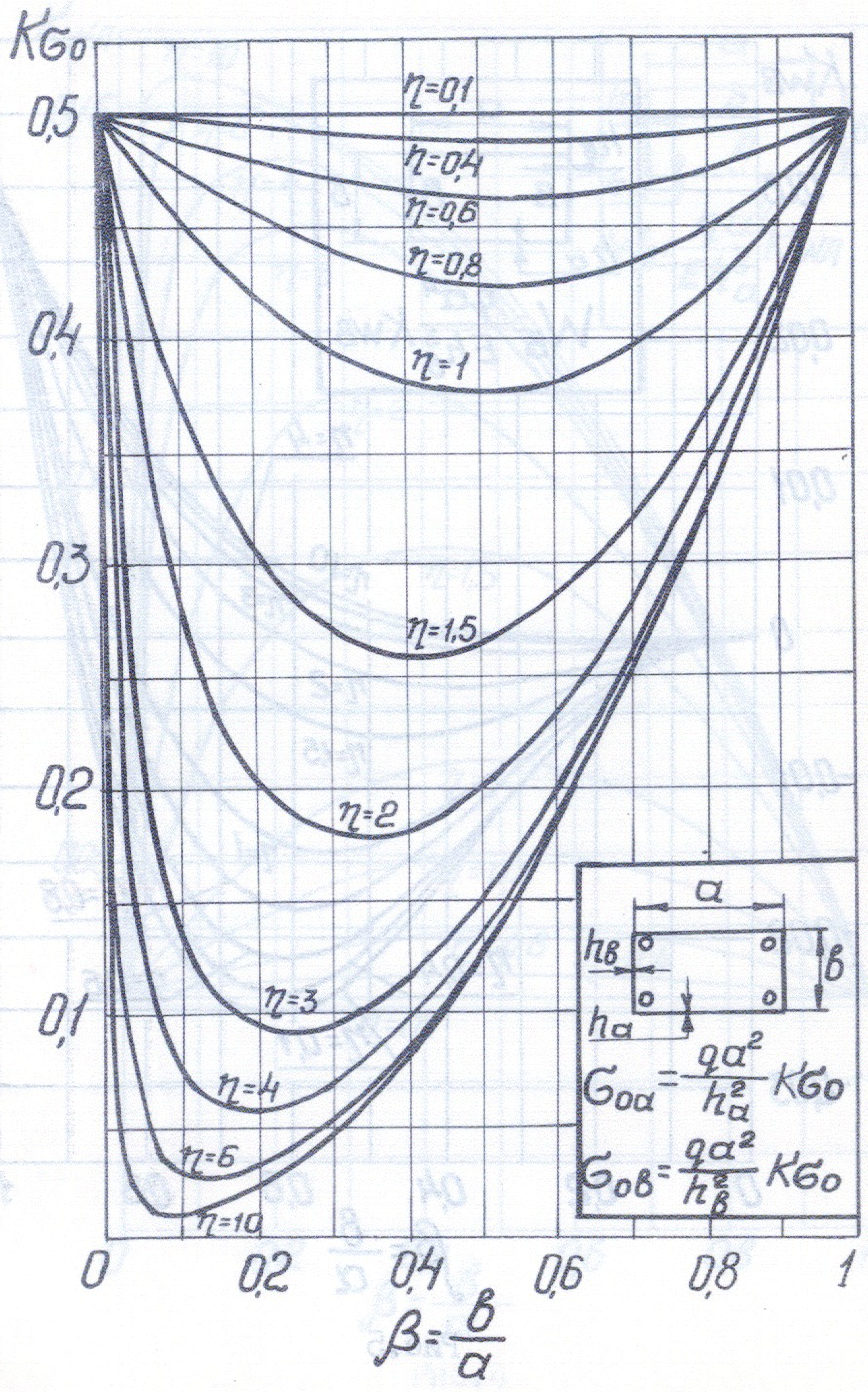
KWA
η=10
η=6
η=4
η=3
η=2
η=1,5
η=1
η=0,8
η=0,6
η=0,4
η=0,1
0,15
0,1
0,05
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
β = в/a
a
hв
A
в
hа
WA = qa⁴/(Eh³а) KWA

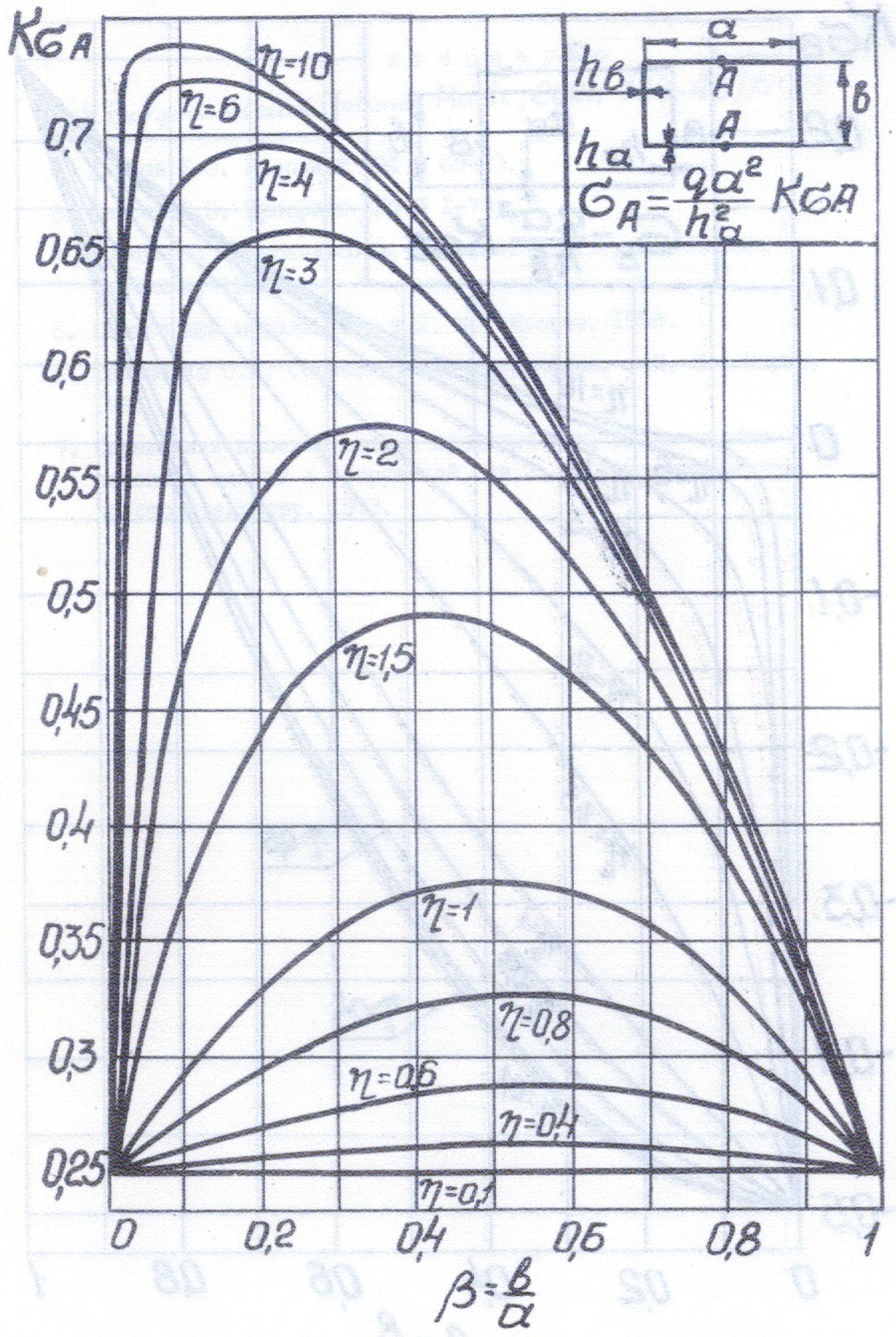
Рис.4



KWB
0,03
0,02
0,01
0
-0,01
-0,02
-0,03
η=4
η=10
η=3
η=2
η=1,5
η=1
η=0,8
η=0,6
η=0,4
η=0,1
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
β = в/a
a
hв
B
B
в
hа
WB = qa⁴/(Eh³в) KWB

Рис.5


Kσo
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
β = b/a
η=0,1
η=0,4
η=0,6
η=0,8
η=1
η=1,5
η=2
η=3
η=4
η=6
η=10
a
b
hв
ha
σoa = qa²/h²a Kσo
σoв = qa²/h²в Kσo


KσA
0,7
0,65
0,6
0,55
0,5
0,45
0,4
0,35
0,3
0,25
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
β = b/a
η=10
η=6
η=4
η=3
η=2
η=1,5
η=1
η=0,8
η=0,6
η=0,4
η=0,1
a
b
A
hв
ha
σA = qa²/h²a KσA

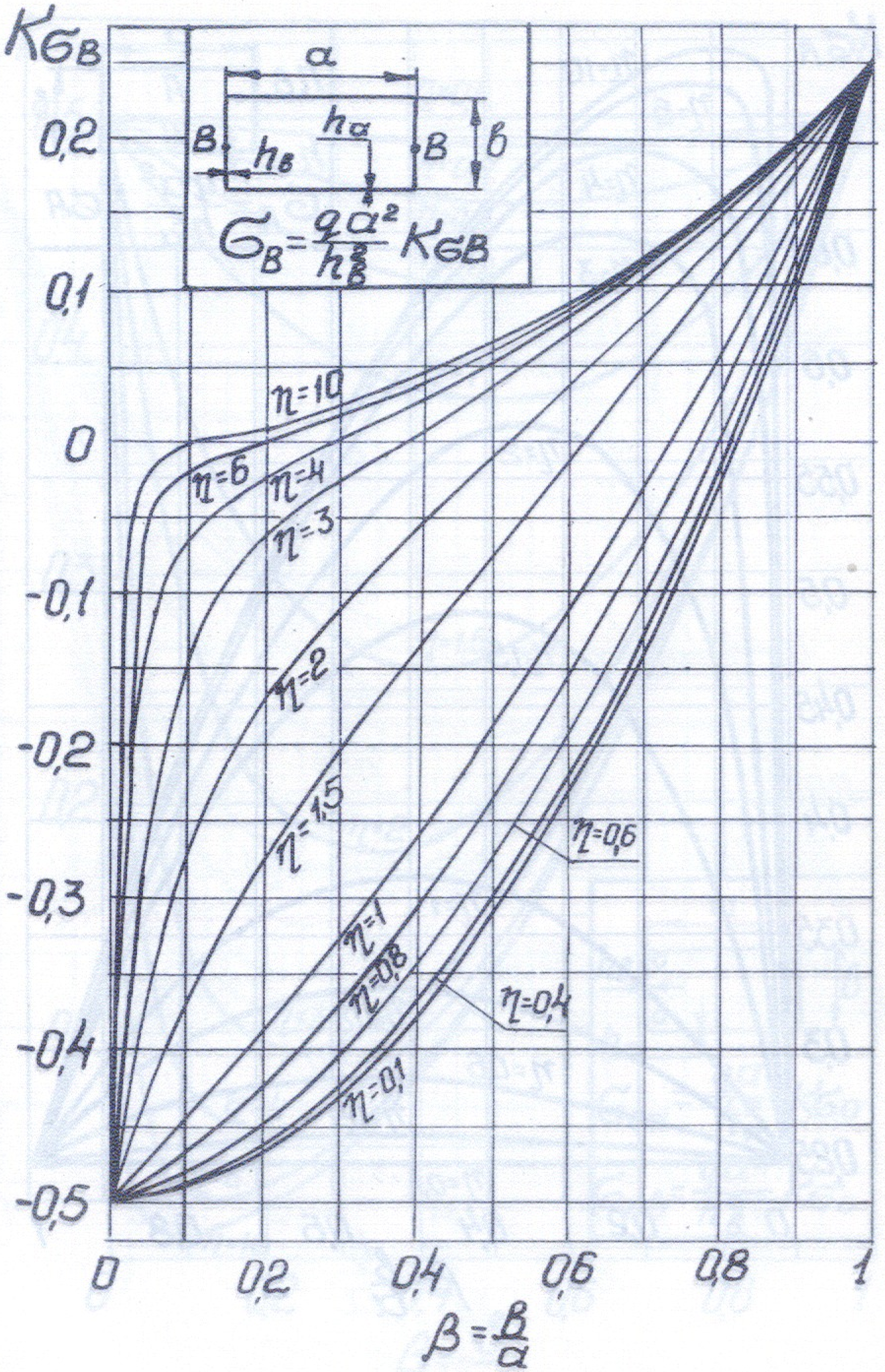


Рис.8

Литература

I. H. Bargmann and Jolande Marti, CERN-ISR-GE/72-29

2. Персов Б.З. Препринт ИЯФ № 69-73.

3. Персов Б.З. Препринт ИЯФ № I-73.

4. „Прочность, устойчивость, колебания", т.I, М., Машиностроение, I968.

5. Справочник металлиста, т.2, М., Машгиз, I958.

6. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов, т.П, М., Наука, I965.

7. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений, кн.2, М., Изд.литературы по строительству, I973.

Работа поступила 24 августа I976г.

Ответственный за выпуск С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 27.УШ-76г. МН 0292I
Усл,I,I печ.л., тираж I50 экз. Бесплатно
Заказ № 78.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР