

Василенко А.Т. и Замолодчиков Б.И.,
Б1-9-8637, ✓

+

С345Г1



В-19

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1405/75

Б1-9-8637

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1975

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Б1-9-8637

С345Г1
В-19

Василенко А.Т., Замолодчиков Б. И.

ПРОБНИК С МАЛЫМ ПРОВИСАНИЕМ

Рукопись поступила
в издательский отдел
.. 25. - февр. - 1975 г.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1975 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан способ существенного уменьшения прогиба консольно закреплённых тонких длинных труб, заключающийся в возбуждении в материале трубы напряжений, обратных по знаку напряжениям от весовой нагрузки /частичная компенсация нагрузки/. Приводится методика расчёта. Прогиб трубы из нержавеющей стали ϕ 34/30,

$L = 3000$ мм при частичной компенсации весовой нагрузки получен равным 1,2 мм, тогда как прогиб такой же трубы под действием собственного веса равен 31 мм.

Зазор между полюсами магнитной системы в релятивистском циклотроне с жёсткой фокусировкой обычно невелик. Поэтому высота ускоряющего электрода дуанта также мала. Например, в релятивистском циклотроне с энергией протонов 600 - 700 Мэв апертура дуанта не может быть более 50 мм. В этих условиях диаметр труб пробников, входящих в апертуру дуанта не может быть более 40 мм. Совершенно очевидно, что под действием собственного веса / в случае консольного закрепления пробников / труба \varnothing 40 мм и $L = 3300$ мм прогнётся существенно больше имеющегося зазора между трубой и крышками дуанта. Осуществление подвески пробников к крышкам дуанта невозможно из-за малой несущей способности крышек.

Наиболее эффективным может оказаться применение одного из способов предварительного напряжения труб пробников. Для выявления влияния предварительно напряжённого состояния трубы на величину её прогибов было изготовлено 2 макета пробников.

Схема первая /черт. 1/

Напряжённое состояние трубы обеспечивалось с помощью двух натяжных лент параллельных оси трубы, но смещённых вверх по отношению к осевой на расстояние "с". В горизонтальной плоскости расстояние между лентами - "в". Концы лент у основания трубы имели натяжное устройство в виде кинематической пары винт-гайка. Вторые концы лент закреплены в одном из сечений трубы.

Схема вторая /черт. 2/

Напряжённое состояние трубы обеспечивалось с помощью троса, расположенного внутри трубы. Концы троса у основания трубы укреплялись на наружной поверхности трубы. Вторым концом, имевшим натяжное устройство винт-гайка, укреплялся в одном из сечений в центре трубы.

В том и другом случаях обеспечивались дополнительные связи натяжного элемента с телом трубы.

Усилие натяжения тросов определялось по формуле

$$Q_0 = \frac{M_u}{z_{вс}(\operatorname{tg} \varphi + \rho') + \frac{2}{3} \cdot \frac{z_2^3 - z_в^3}{z_2^2 - z_в^2}} \dots \dots \dots \quad /I/$$

где $M_u = M_B + M_{m2}$ - замеренный момент в кинематической паре винт-гайка,

M_B - момент трения в резьбе винта,

$$M_B = Q_0 \cdot z_{вс}(\operatorname{tg} \varphi + \rho')$$

M_{m2} - момент трения на торце гайки,

$$M_{m2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(z_2^3 - z_в^3) \cdot Q_0 \cdot f}{z_2^2 - z_в^2}$$

$z_{вс}$ - средний радиус резьбы винта,

φ - угол подъёма винтовой линии,

ρ' - приведенный угол трения для данного профиля резьбы

z_2 - максимальный радиус опорной поверхности гайки,

$z_в$ - наименьший радиус опорной поверхности гайки,

f - коэффициент трения торца гайки по опоре.

Момент M_u измерялся с помощью пружинного динамометра. Отсчёт производился после начала движения гайки. Измерение прогиба упругой линии трубы производилось по отношению к контрольной плите с помощью рейсмуса.

Уравнение упругой линии консольно заделанной балки

а/ с равномерно распределённой нагрузкой q

$$y_1 = \frac{q}{EJ} \left(\frac{x^4}{24} - \frac{x^3}{6} L + \frac{x^2}{4} L^2 \right)$$

б/ нагруженной сосредоточенной силой Q на конце

$$y_2 = \frac{Q}{EJ} \left(\frac{x^2}{2} L - \frac{x^3}{6} \right)$$

в/ нагруженной сосредоточенным моментом M_c на конце

$$y_3 = \frac{M_c}{EJ} \cdot \frac{x^2}{2}$$

Начало отсчёта - заделанный конец балки.

По первой схеме было поставлено два эксперимента:

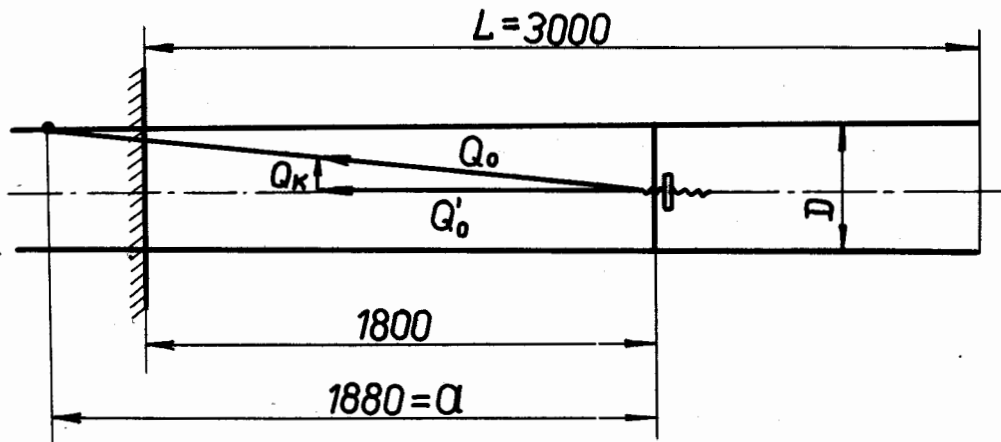
1. Труба находилась под действием собственного веса $q = 15,9 \cdot 10^{-3}$ кг/см. Определялась величина компенсирующего момента M_k / в сечении $X = 1500$ мм/, при котором прогиб упругой линии в сечении $X = 2700$ мм равен 1,2 мм.

2. Труба нагружалась равномерно распределённой нагрузкой с интенсивностью $q = 19,4 \cdot 10^{-3}$ кг/см и сосредоточенной силой $Q_1 = 130$ г. /имитация державки с мишенью/. Там же определялась величина компенсирующего момента M_k в условиях, оговоренных выше. Результаты обработаны методом графического интегрирования и приведены на рис. 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Результаты решения и эксперимента сведены в таблицу. Графический способ решения задачи в этом случае наиболее простой и наглядный.

По второй схеме труба нагружалась равномерно распределённой нагрузкой $q = 19,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см, сосредоточенными силами $Q_1 = 130$ г, $Q_2 = 275$ г. С помощью натяжной проволоки возбуждалась сила Q_k , компенсирующая первоначальный прогиб.

При этом не ставилась задача 100% компенсации первоначального прогиба. Измерялись координаты упругой линии трубы и момент затяжки гайки в винтовой шаре натяжного устройства.

Из формулы 1 и эскиза натяжного устройства определялась величина Q_k .



$$Q'_0 \approx Q_0, \quad a = 1880 \text{ мм}, \quad D = 34 \text{ мм}$$

$$\frac{Q_k}{Q_0} = \frac{D}{2a}; \quad Q_k = \frac{D}{2a} \cdot Q_0; \quad Q_0 \text{ см. формулу /I/}$$

где $\operatorname{tg} \rho' = 1,17 \operatorname{tg} \rho; \quad \operatorname{tg} \rho = f$

Коэффициент трения для пары сталь-сталь с попаданием смазки находится в пределах 0,1 - 0,18. Взято $f = 0,13$. Решения в виде графиков см. рис. 7, 8 и 9. Расхождение результатов решения и эксперимента обусловлено незнанием точного значения коэффициента трения. Результаты решения и эксперимента сведены в таблицу.

Схема I

а/ Труба под действием собственного веса /см. рис. 1, 2, 3.

$X_{\text{см}}$	0	20	40	60	80	100	120	140
M_{ϕ} КГ·СМ	715	620	540	456	385	318	256	204
M_k КГ·СМ	492	492	492	492	492	492	492	492
M КГ·СМ	223	128	48	-36	-107	-174	-236	-288

$X_{\text{см}}$	150	160	180	200	220	240	260	280	300
M_q кг·см	178	156	114	79,5	51	28,6	12,7	3,18	0
M_K кг·см	492	-	-	-	-	-	-	-	-
M кг·см	+178 -314	+156	114	79,5	51	28,6	12,7	3,18	0

$$M_q = \frac{q}{2}(L-x), \quad q = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}, \quad L = 300 \text{ см}, \quad X - \text{в см.}$$

$$M_K = 492 \text{ кг см}, \quad M_{u1} = 28,8 \text{ кг см}, \quad M_{u2} = 26,4 \text{ кг см},$$

M_{u1} и M_{u2} - измеренные значения моментов в натяжном устройстве.

Усилия натяжения проволоки соответственно равны $Q_{10} = 171 \text{ кг}$,

$$Q_{20} = 157 \text{ кг}, \quad Q_0 = Q_{10} + Q_{20}, \quad Q_0 = 328 \text{ кг. Здесь } \varphi = 0,15.$$

Плечо приложения сил $C = 1,5 \text{ см}$. Измеренное значение прогиба в сечениях $X = 2700 \text{ мм}$ $y_{\text{э}} = 1,2 \text{ мм}$. Расчетное значение прогиба

$$y_p = 0,88 \text{ мм.}$$

б/ Труба под действием равномерно распределённой нагрузки

$$q = 19,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см} \text{ и сосредоточенной силы } Q_1 = 130 \text{ г.}$$

/ см. рис 4; 5, 6/.

$X_{\text{см}}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	160
M_q кг·см	875	755	660	560	465	388	310	250	218	190
M_{Q1} кг·см	39	36,4	33,8	31,2	28,6	26	23,4	20,8	19,5	18,2

X_{CM}	0	20	40	60	80	100	120	140	150	160
M_K КГ·СМ	627	627	627	627	627	627	627	627	627	-
M КГ·СМ	287	164	66,8	-36	-133	-213	-294	-356	+237,5 -389,5	208

X_{CM}	180	200	220	240	260	280	300
M_q КГ·СМ	140	97	62	35	15,5	3,9	0
M_{q_1} КГ·СМ	15,8	13	10,4	7,8	5,2	2,6	0
M_K	-	-	-	-	-	-	-
M КГ·СМ	156	110	72,4	42,8	20,7	6,5	0

$$M_q = \frac{q}{2}(L-x)^2, \quad M_{q_1} = Q_1(L-x)$$

$$M_{u_1} = 36,5 \text{ кг см}, \quad M_{u_2} = 33,5 \text{ кг см}, \quad Q_{10} = 217 \text{ кг}, \quad Q_{20} = 200 \text{ кг}$$

$$M_K = 627 \text{ кг см.}$$

Измеренное значение прогиба в сечении $X = 2700 \text{ мм}$ $y_3 = 1,2 \text{ мм.}$

Расчётное значение прогиба $y_p = 0,9 \text{ мм.}$

Схема II

Труба нагружена равномерно распределённой нагрузкой

$$q = 19,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см и сосредоточенными силами}$$

$$Q_1 = 135 \text{ г}, \quad Q_2 = 275 \text{ г}, \quad Q_K = 4,85 \text{ кг}$$

/см. рис 7, 8 и 9/

$X_{\text{см}}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
M_q КГ-СМ	865	750	650	552	465	385	310	245	188	138
M_{Q_1} КГ-СМ	40,5	37,8	35,1	32,4	29,7	27	24,3	21,6	19	16,2
M_{Q_2} КГ-СМ	49,4	44	38,5	33	27,5	22	16,5	11	5,5	0
M_K	-875	-775	-680	-580	-485	-388	-290	-194	-97	0
M КГ-СМ	80	57	43,6	37,4	37,2	46	61	83,6	115,5	154

$X_{\text{см}}$	200	220	240	260	280	300
M_q	96,0	61,5	34,5	15,4	3,85	0
M_{Q_1}	13,5	10,7	8	5,5	2,5	0
M_{Q_2}	-	-	-	-	-	-
M_K	-	-	-	-	-	-
M	109,5	72,5	42,5	21	6,35	0

$$M_q = \frac{q}{2} (L-x)^2, \quad 0 \leq x \leq L$$

$$M_{Q_1} = Q_1 (L-x), \quad 0 \leq x \leq L$$

$$M_{Q_2} = Q_2 (L-120-x), \quad 0 \leq x \leq (L-120), \text{ где } L \text{ и } x \text{ в см}$$

$$M_k = Q_k (L-120-x), \quad 0 \leq x \leq (L-120), \text{ где } L \text{ и } x \text{ в см}$$

$$M_u = 80 \text{ кг} \cdot \text{см} \quad Q_0 = Q'_0 = \frac{80}{0,148} = 540, \quad Q_0 = 540 \text{ кг}$$

Экспериментально определённые координаты упругой линии

Х см	100	200	268
У _э мм	0,15	0,95	3,63
У _р мм	0,47	2,17	4,3

У_э - экспериментальное значение прогиба

У_р - расчётное значение прогиба

Расхождение объясняется наличием прогиба на трубе и незнанием точного значения коэффициента трения f в элементах натяжного устройства.

Первая и вторая схема предварительного натяжения трубы пробника может быть с успехом применена в практике построения пробников с малым допустимым провисанием.

Графическое решение аналогичных задач может широко применяться в конструкторской практике.

В рассмотренных конструктивных схемах пробников могут быть легко возбуждены колебания при приложении силы к свободному концу. При приложении силы у места закрепления трубы колебания не возбуждаются, что имеет место в реальных схемах

Работа выполнена в 1963 году.

$$M_q = \frac{q}{2} (L-x)^2, \quad 0 \leq x \leq L$$

$$M_{Q_1} = Q_1 (L-x), \quad 0 \leq x \leq L$$

$$M_{Q_2} = Q_2 (L-120-x), \quad 0 \leq x \leq (L-120), \text{ где } L \text{ и } x \text{ в см}$$

$$M_k = Q_k (L-120-x), \quad 0 \leq x \leq (L-120), \text{ где } L \text{ и } x \text{ в см}$$

$$M_u = 80 \text{ кг} \cdot \text{см} \quad Q_0 = Q'_0 = \frac{80}{0,148} = 540, \quad Q_0 = 540 \text{ кг}$$

Экспериментально определённые координаты упругой линии

Х см	100	200	268
У _э мм	0,15	0,95	3,63
У _р мм	0,47	2,17	4,3

У_э - экспериментальное значение прогиба

У_р - расчётное значение прогиба

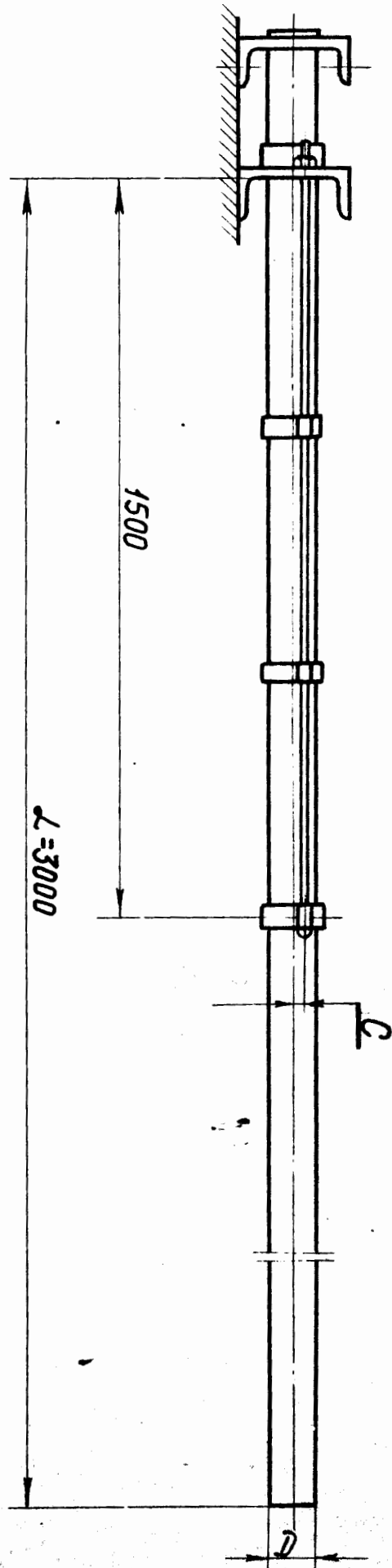
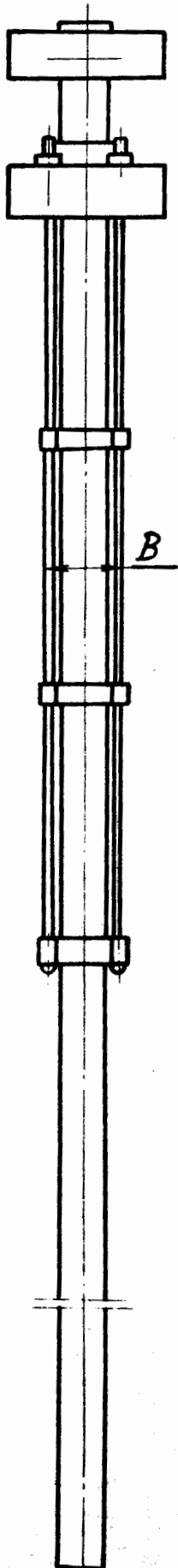
Расхождение объясняется наличием погиба на трубе и незнанием точного значения коэффициента трения f в элементах натяжного устройства.

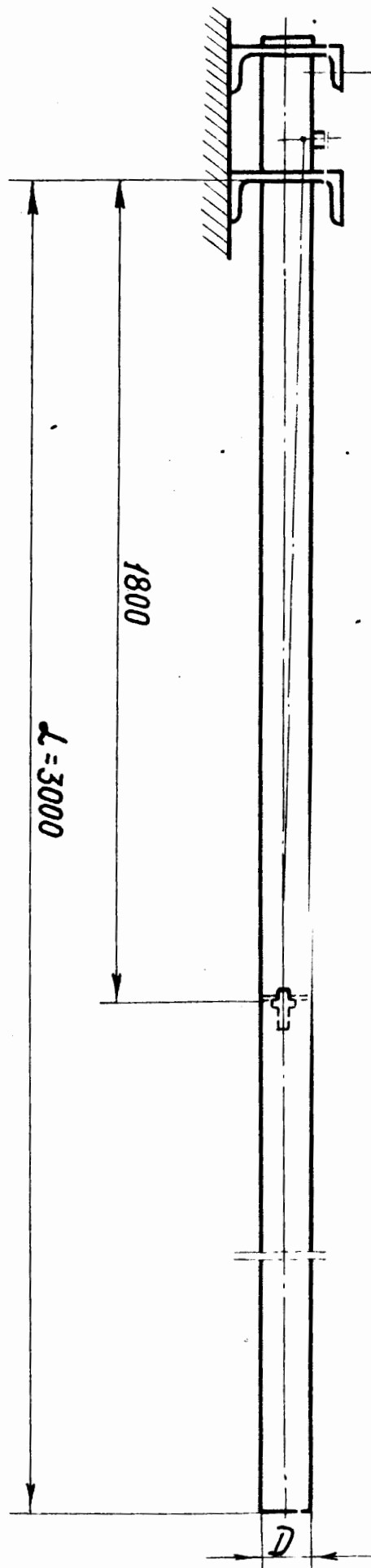
Первая и вторая схема предварительного натяжения трубы пробника может быть с успехом применена в практике построения пробников с малым допустимым провисанием.

Графическое решение аналогичных задач может широко применяться в конструкторской практике.

В рассмотренных конструктивных схемах пробников могут быть легко возбуждены колебания при приложении силы к свободному концу. При приложении силы у места закрепления трубы колебания не возбуждаются, что имеет место в реальных схемах

Работа выполнена в 1963 году.





m_1 -масштаб по оси y $m_1 = 4,75 \frac{\text{кг см}}{\text{мм}}$

m_2 -масштаб по оси x $m_2 = 2 \frac{\text{см}}{\text{мм}}$

$q = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}$, $M_K = 492 \text{ кг см}$

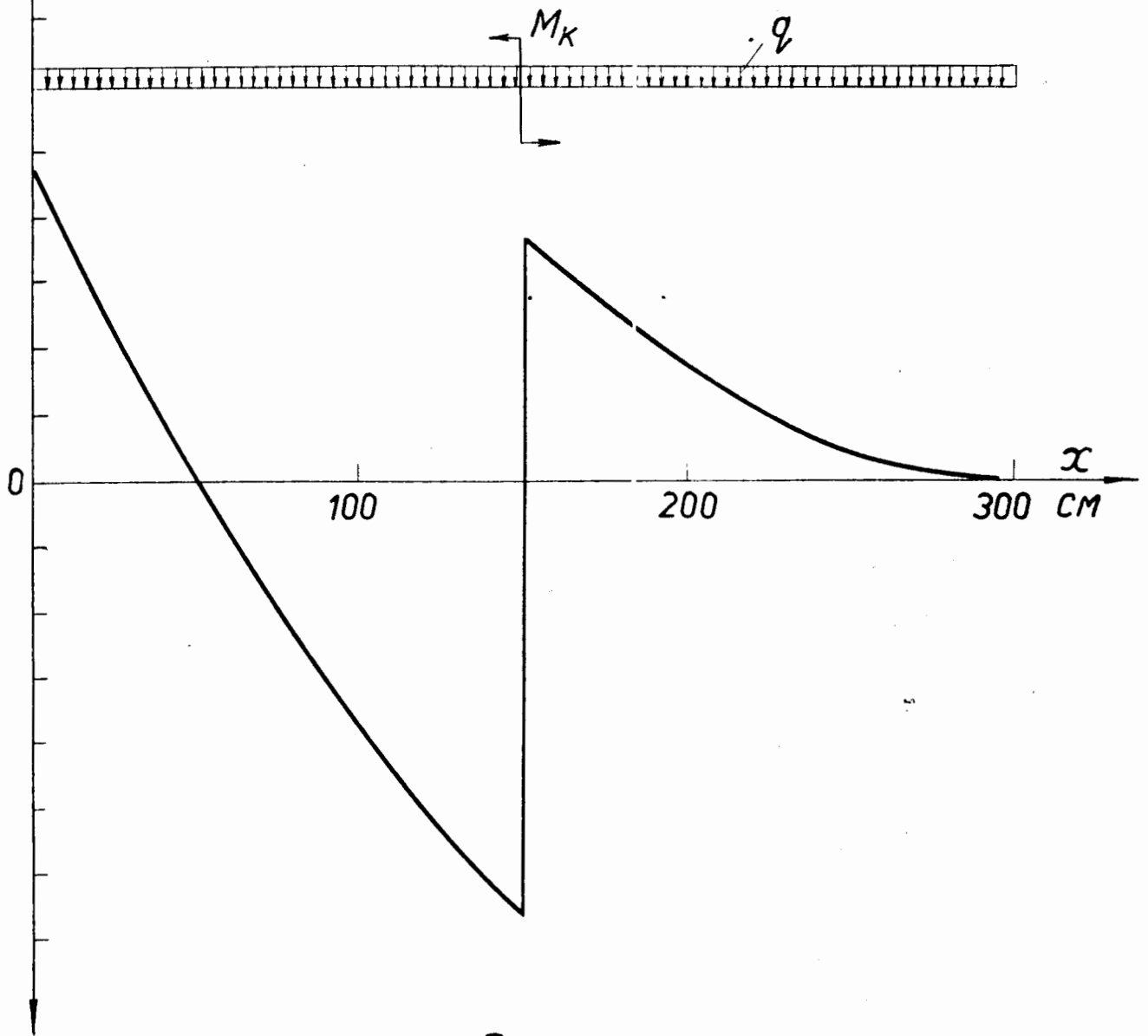


Рис.1.

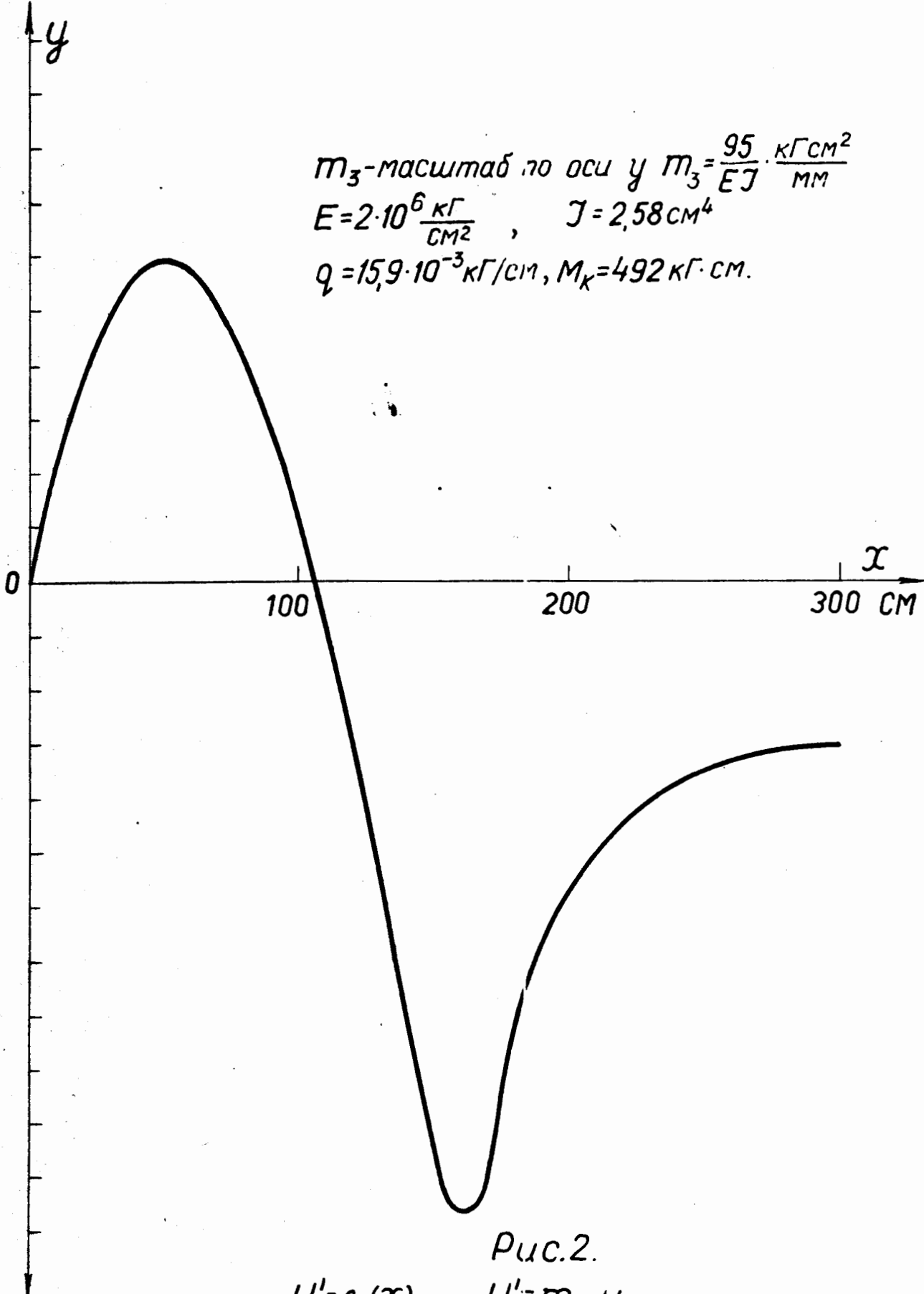
$$M = f_1(x) \quad M = m_1 \cdot y$$

График построен для трубы $\phi 34/30$ ст. 1Х18Н9Т,
укрепленной консольно.

$y' = m_1 \cdot m_2 \cdot S_x \frac{1}{K}$ угол поворота сечения с координатой x .

S_x - площадь эллипса в мм^2 , соответствующая сечению x .

$$K = EJ$$

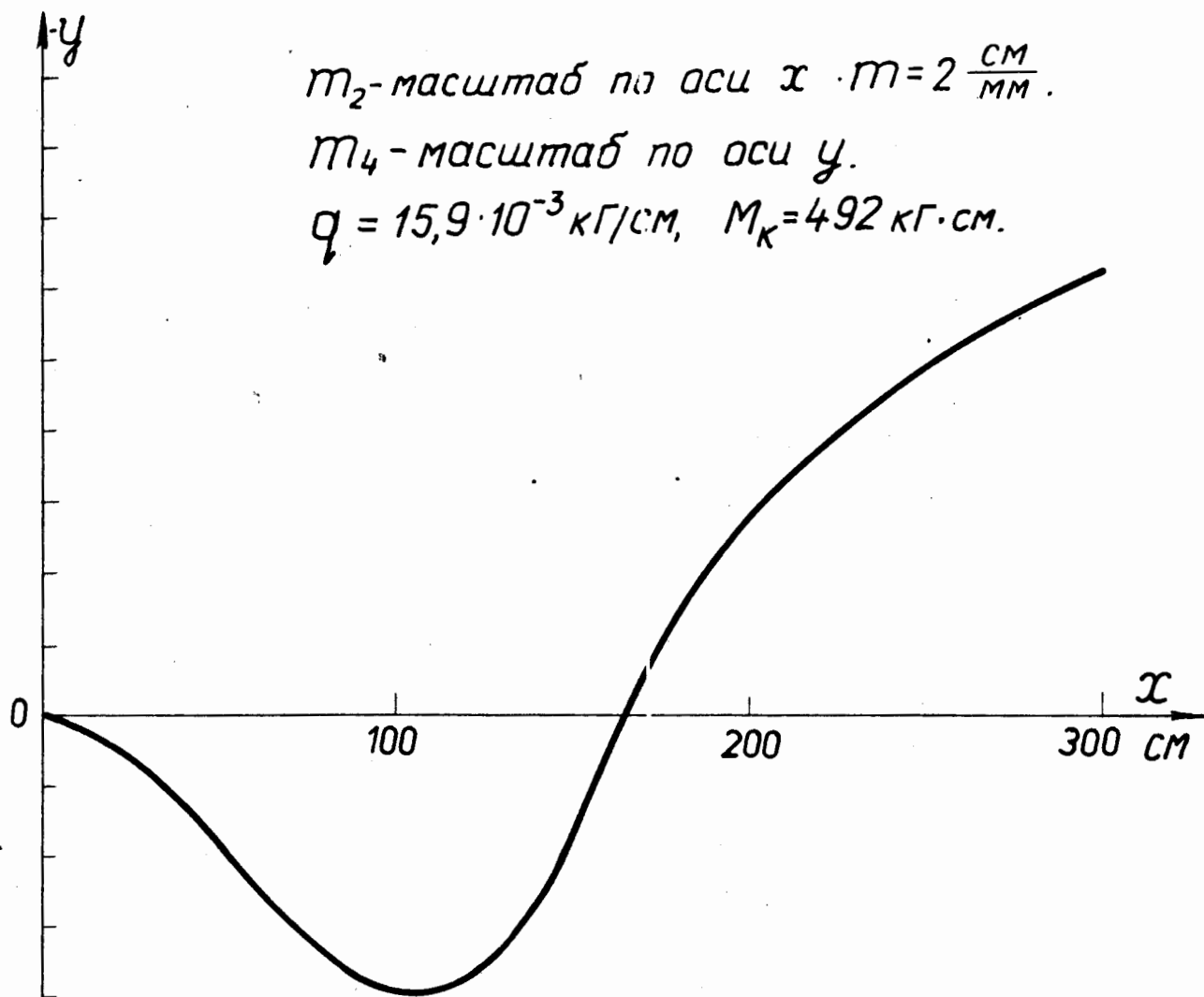


m_3 -масштаб по оси y $m_3 = \frac{95}{EJ} \cdot \frac{\text{кгсм}^2}{\text{мм}}$
 $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $J = 2,58 \text{ см}^4$
 $q = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}$, $M_K = 492 \text{ кг} \cdot \text{см}$.

Рис.2.

$y' = f_2(x)$, $y' = m_3 \cdot y$

$y = m_2 \cdot m_3 \cdot S_x$ - прогиб упругой линии трубы
 в сечении x
 S_x - площадь эякры $y' = f_2(x)$ в мм^2 ,
 соответствующая сечению x .



m_2 -масштаб по оси x $m = 2 \frac{\text{CM}}{\text{MM}}$.

m_4 -масштаб по оси y .

$q = 15,9 \cdot 10^{-3} \text{ КГ/CM}$, $M_K = 492 \text{ КГ}\cdot\text{CM}$.

Рис.3.

$$y = f_3(x) \quad y = m_4 \cdot y, \quad m_4 = \frac{0,95 \cdot 10^4}{EJ} \cdot \frac{\text{КГ}\cdot\text{CM}^3}{\text{MM}}$$

График построен для $J = 2,58 \text{ CM}^4$, $E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{КГ}}{\text{CM}^2}$

y -прогиб упругой линии трубы.

m_1 - масштаб по оси y $m_1 = 4,75 \frac{\text{кг} \cdot \text{см}}{\text{мм}}$

m_2 - масштаб по оси x $m_2 = 2 \frac{\text{см}}{\text{мм}}$

$q = 19,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}$

$M_K = 627 \text{ кг} \cdot \text{см}$

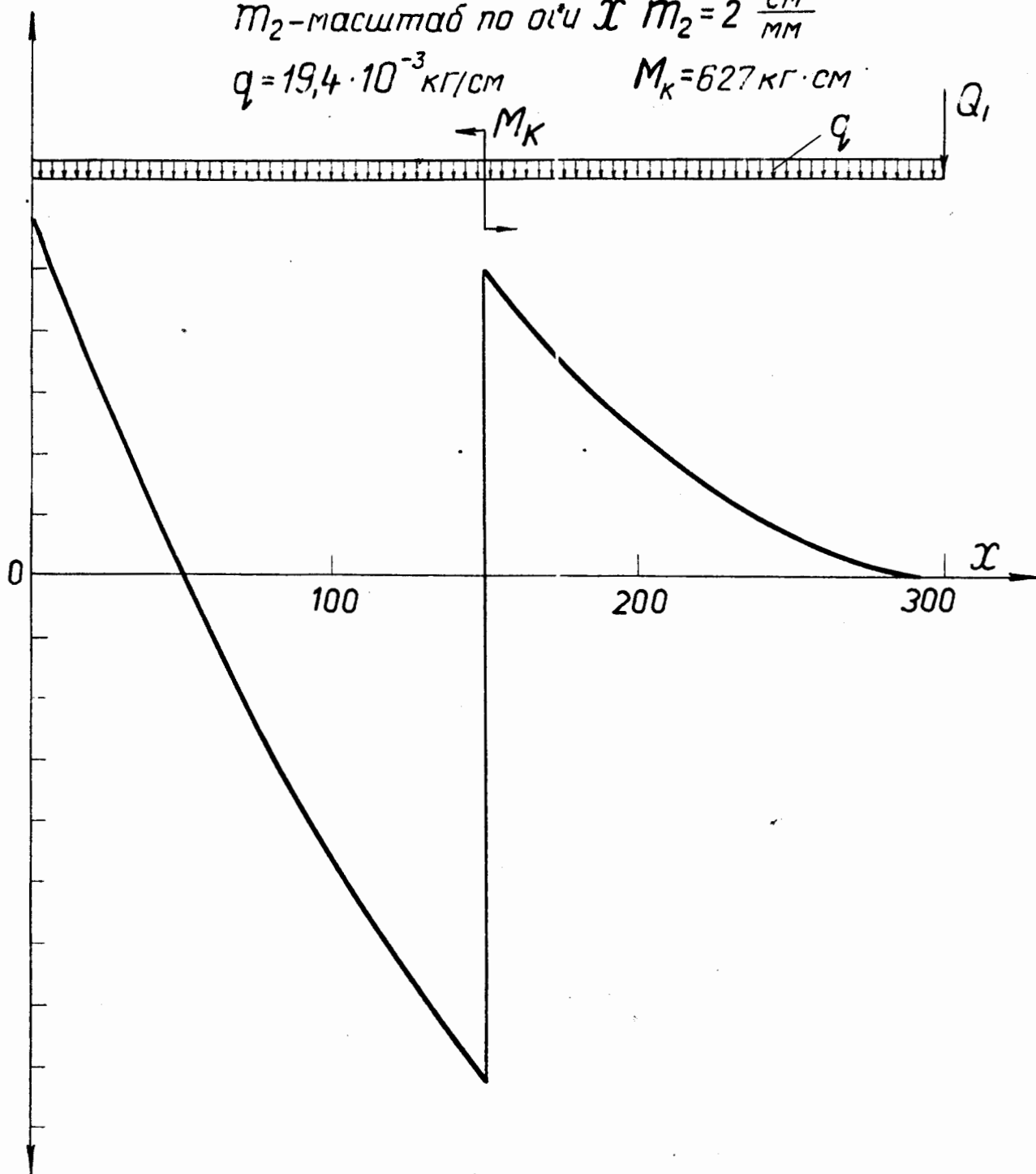


Рис. 4.

$$M = f_4(x) \quad M = m_1 \cdot y$$

График построен для трубы $\phi 34/30$ ст. 1Х18Н9Т,
укрепленной консольно.

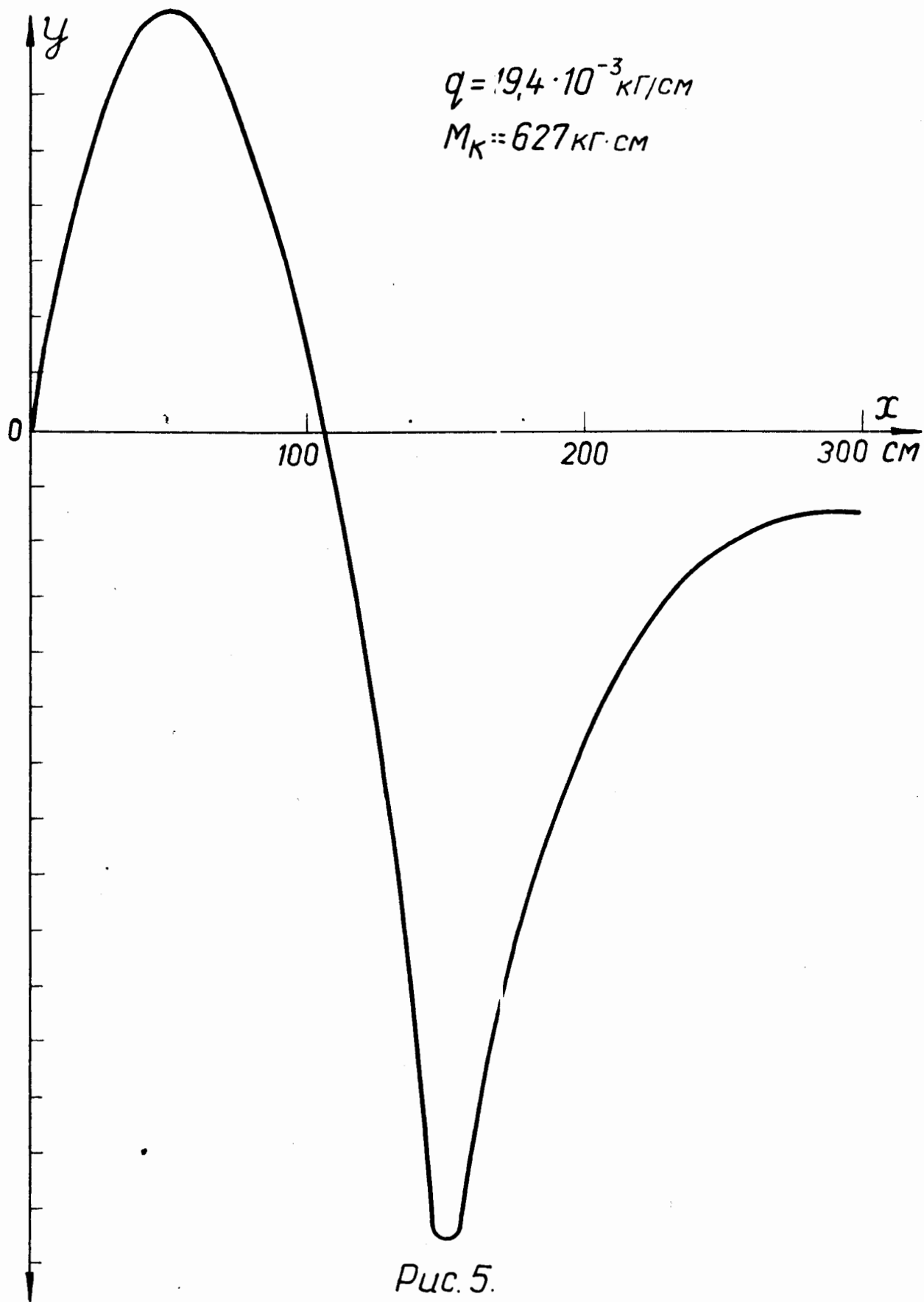


Рис. 5.

$$y' = f_5(x) \quad y' = m_3 \cdot y$$

y' - угол поворота сечения x

$$m_3 - \text{масштаб по оси } y, \quad m_3 = \frac{95}{EJ} \cdot \frac{\text{кг} \cdot \text{см}^2}{\text{мм}}$$

$$E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \quad J = 2,58 \text{ см}^4$$

$$\begin{aligned}
 m_2 - \text{масштаб по оси } x & \quad m_2 = 2 \frac{\text{см}}{\text{мм}} \\
 m_4 - \text{масштаб по оси } y & \quad m_4 = \frac{0,95 \cdot 10^4 \cdot \text{кг см}^3}{EJ} \\
 E = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} & \quad J = 2,58 \text{ см}^4 \\
 q = 19,4 \text{ кг/см} & \quad M_K = 627 \text{ кг/см}
 \end{aligned}$$

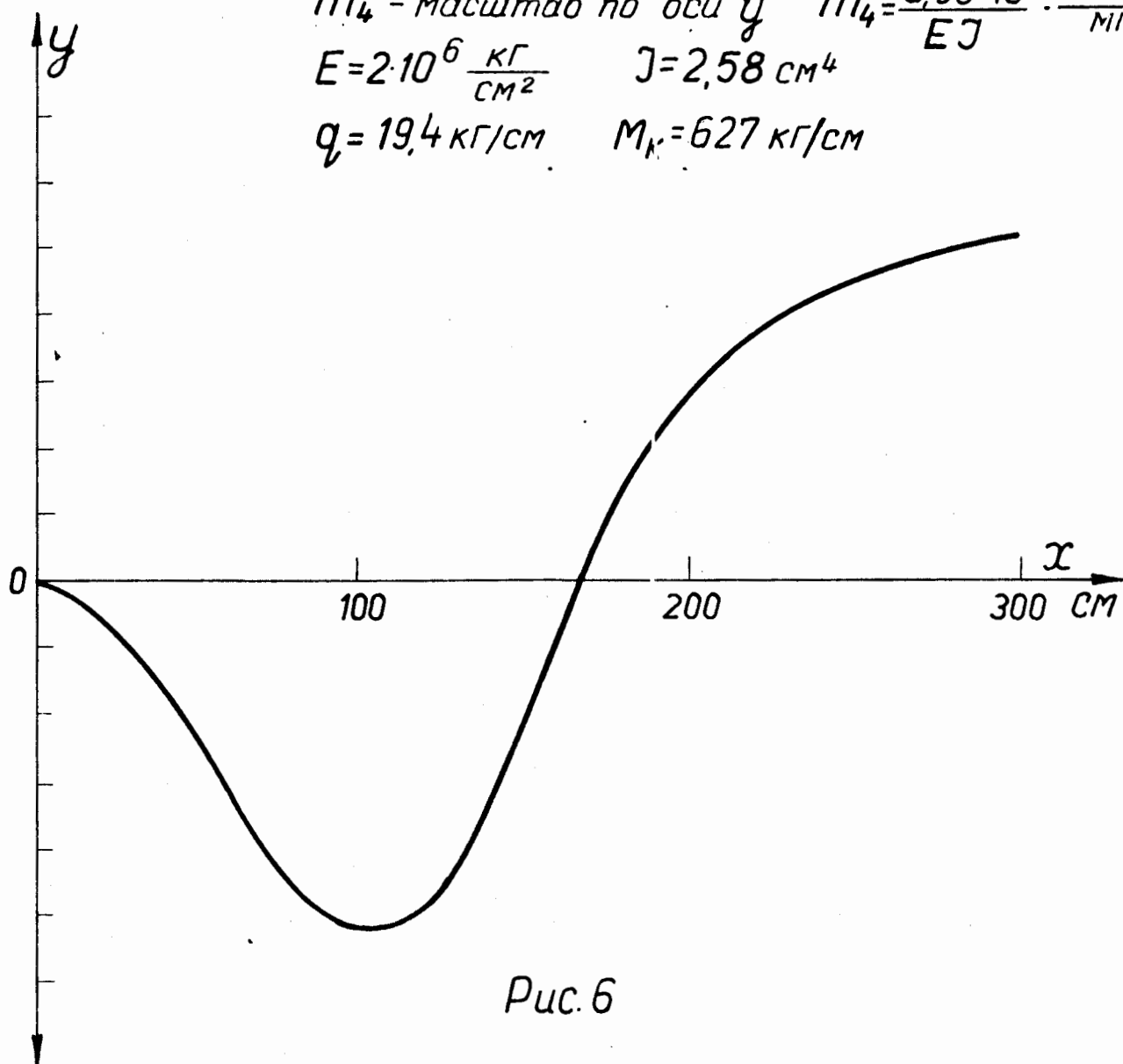


Рис. 6

$$y = f_6(x) \quad Y = m_4 \cdot y$$

y - прогиб упругой линии трубы.

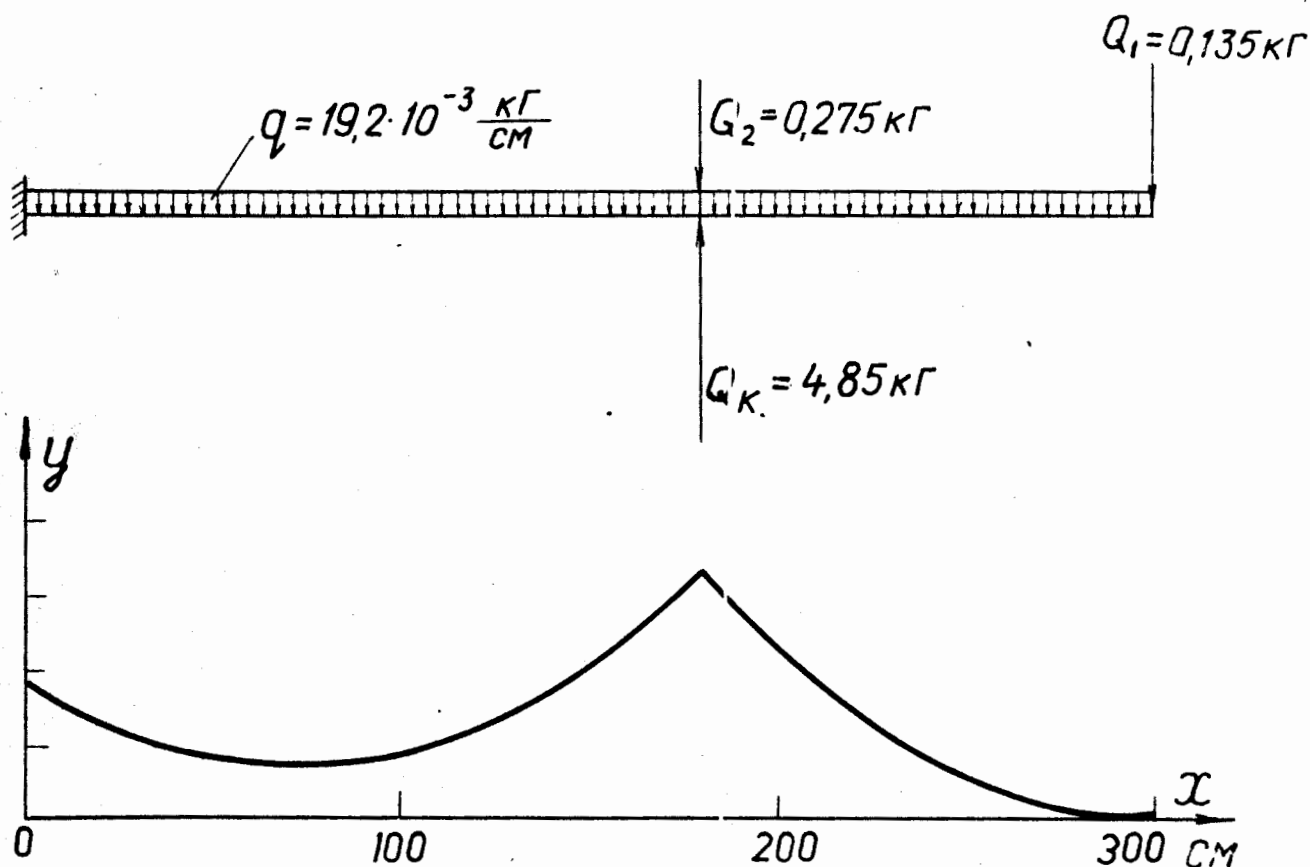


Рис. 7.

$$M = f_7(x)$$

$$M = m_1 \cdot y$$

График построен для трубы $\phi 34/30$ ст 1Х18Н9Т,
укрепленной консольно.

m_1 -масштаб по оси y , $m_1 = 4,75 \frac{\text{кг см}}{\text{мм}}$

m_2 -масштаб по оси x , $m_2 = 2 \frac{\text{см}}{\text{мм}}$

$y' = \frac{1}{EJ} m_1 \cdot m_2 \cdot S_x$ - угол поворота сечения с координатой x .

S_x - площадь эюры в мм^2 , соответствующая сечению x .

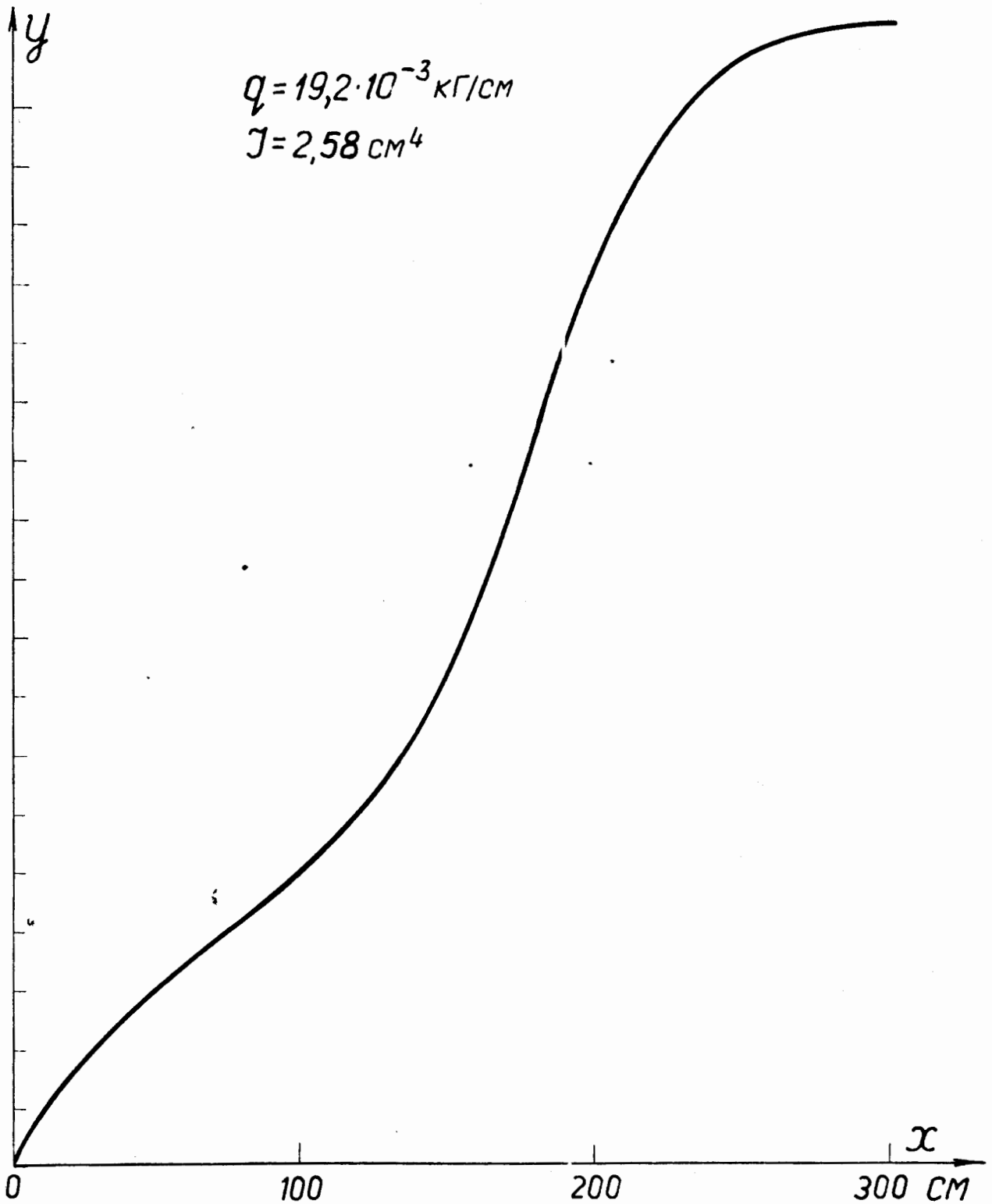


Рис. 8.

$$y' = f_8(x) \quad y' = m_3 \cdot y$$

$y = m_2 \cdot m_3 \cdot S_x$ - прогиб упругой линии трубы в сечении x .

S_x - площадь эпюры $y' = f_8(x)$ в мм^2 , соответствующая сечению x .

m_3 - масштаб по оси y , $m_3 = \frac{95}{EJ} \cdot \frac{\text{КГ СМ}^2}{\text{ММ}}$

m_2 - масштаб по оси x , $m_2 = 2 \frac{\text{СМ}}{\text{ММ}}$

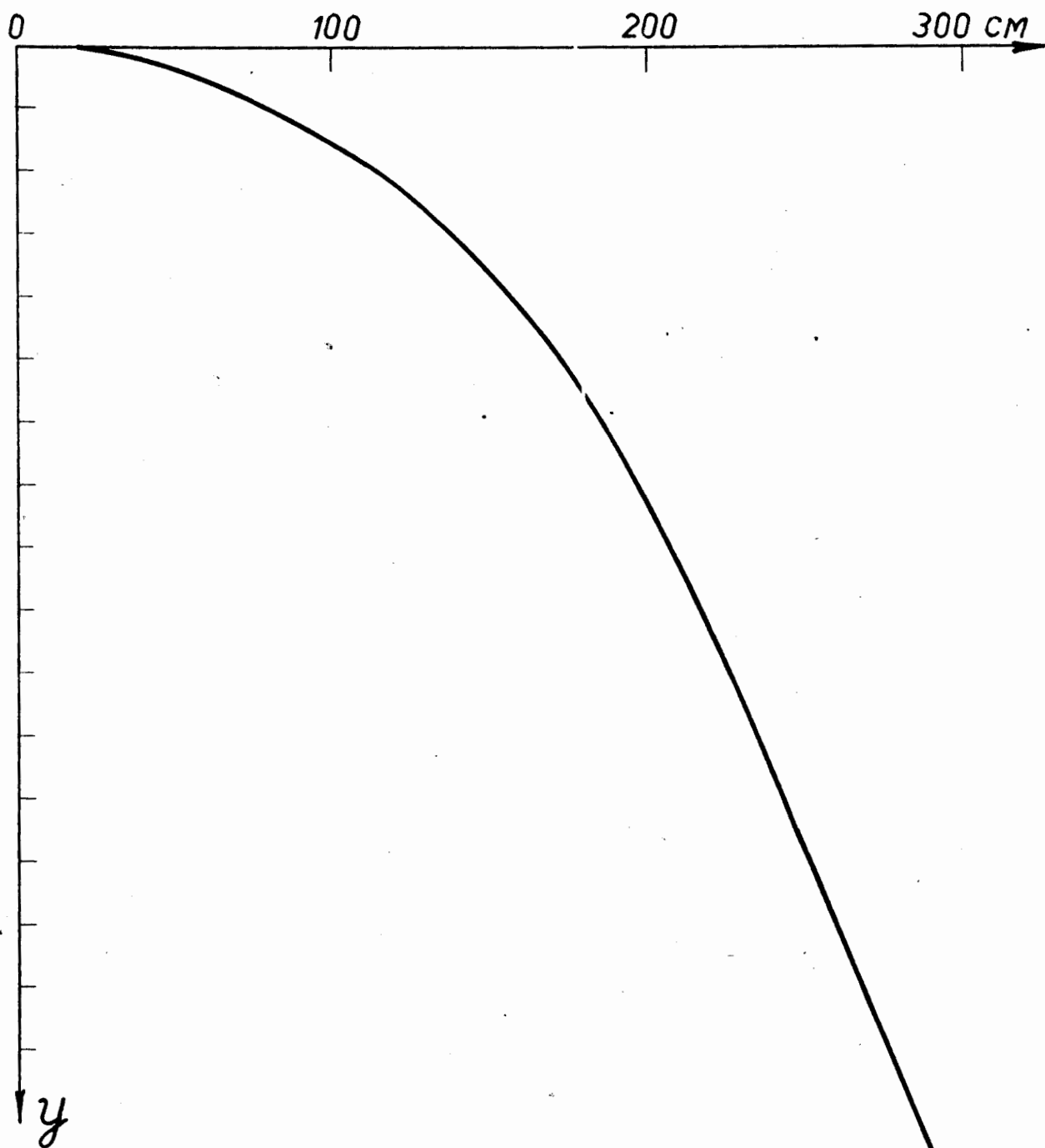


Рис. 9.

$$y = f_9(x) \quad y = m_5 \cdot y$$

y - прогиб упругой линии трубы

m_5 - масштаб по оси y , $m_5 = \frac{1,52 \cdot 10^4}{EJ} \cdot \frac{\text{кг см}^2}{\text{мм}}$

$E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$

$J = 2,58 \text{ см}^4$

$q = 192 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см.}$