

Новосибирская Государственная Академия Водного Транспорта

На правах рукописи

УДК 629.12.001.11:532.5

Готман Ада Шоломовна

ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ОБВОДОВ ВОДОИЗМЕЩАЮЩИХ СУДОВ
(Том приложений)

05.08.01 Теория корабля

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Готман

Новосибирск
1996

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Аппроксимация обводов судов, спроектированных
из развёртывающихся поверхностей 3

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблицы расчёта вызванных скоростей по Хессу-Смиту . . . 13

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Потенциал источника с исключением капиллярных
волн 20

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Чертежи обводов и графики результатов расчётов
волнового сопротивления моделей Виглея и Вейнблума . . 31

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблицы коэффициентов оптимальных ватерлиний
для случая $\delta = 0,6$ на числе Фруда 0,27 74

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АППРОКСИМАЦИЯ ОБВОДОВ СУДОВ, СПРОЕКТИРОВАННЫХ ИЗ РАЗВЁРТЫВАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

уравнение корпуса судна с обводами, спроектированными из развёртывающихся поверхностей, записывается в виде

$$y = y_b + y_c + y_s, \quad (\text{П1.1}) \quad \text{где}$$

y_b - уравнение носовой оконечности, y_s - уравнение кормовой оконечности, а y_c - уравнение цилиндрической вставки.

Уравнения оконечностей получаются в зависимости от z и x в виде

$$y = \frac{D_1 z^3 + D_2 z^2 + D_3 z + D_4 xz + D_5 x^2 z + D_6 x z^2 + D_7 x^2 + D_8 x + D_9}{(D_{10} + D_{11} z)^2}, \quad (\text{П1.2})$$

а для цилиндрической вставки использован многочлен в виде

$$y = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + A_3 z^3 + A_4 z^4. \quad (\text{П1.3})$$

Интеграл Мичелла приведен к виду

$$R_w = \frac{4\rho g^2}{\pi V^2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \left(\frac{L}{2}\right)^2 \int_0^{\pi/2} [I^2(\theta) + J^2(\theta)] \sec^3 \theta d\theta, \quad (\text{П1.4})$$

где $I(\theta) = \int_{-1}^1 \int_0^{z(x)} f_x(x, z) e^{-\rho z} \sin kx dz dx,$

$$J(\theta) = \int_{-1}^1 \int_0^{z(x)} f_x(x, z) e^{-\rho z} \cos kx dz dx. \quad (\text{П1.5})$$

Для того, чтобы получить уравнение оконечностей судна в виде (2), требуется задать уравнения двух ватерлиний в виде квадратичных параболических кривых, т.е.

$$y = m_0 + m_1 x + m_2 x^2, z = t_1, \quad (\text{П1.6})$$

$$y = n_0 + n_1 x + n_2 x^2, z = t_2.$$

Тогда входящие в уравнение (П1.2) коэффициенты записываются в виде

$$D_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} [4 (m_2 - n_2)^2 (n_0 - m_0) + (m_2 - n_2) (n_1 - m_1)^2];$$

$$D_2 = \frac{4}{t_2 - t_1} [(m_2 - n_2)^2 (t_2 m_0 - t_1 n_0) - 2(n_2 t_2 - m_2 t_1) \times (m_2 - n_2) (m_0 - n_0)] +$$

$$\frac{1}{t_2 - t_1} [2 (m_1 - n_1)^2 (n_2 t_2 - m_2 t_1) + (m_1 - n_1)^2 (t_1 n_2 - t_2 m_2)];$$

$$D_3 = \frac{1}{t_2 - t_1} \{4 (n_2 t_2 - m_2 t_1)^2 (n_0 - m_0) + 8(n_2 t_2 - m_2 t_1) \times (m_2 - n_2) \times (t_2 m_0 - t_1 n_0) + (m_1 - n_1)^2 \cdot [m_2 t_1^2 - n_2 t_2^2 + 2 t_1 t_2 (m_2 - n_2)]\};$$

$$D_4 = 4[m_2 n_2 (m_1 + n_1) (t_2 + t_1) - 2(m_1 t_2 n_2^2 + n_1 t_1 m_2^2)];$$

$$D_5 = 4 m_2 n_2 (m_2 - n_2) (t_2 - t_1);$$

$$D_6 = 4(m_2 - n_2) (m_2 n_1 - m_1 n_2);$$

$$D_7 = 4 m_2 n_2 (t_2 - t_1) (n_2 t_2 - m_2^2 t_1);$$

$$D_8 = 4(n_2 t_2 - m_2 t_1) (m_1 t_2 n_2 + n_1 t_1 m_2);$$

$$D_9 = \frac{1}{t_2 - t_1} [4(n_2 t_2 - m_2 t_1)^2 (t_2 m_0 - t_1 n_0) + (n_2 t_2 - m_2 t_1) (m_1 - n_1)^2 t_1 t_2] ; \quad (\text{П1.7})$$

$$D_{10} = 2(n_2 t_2 - m_2 t_1) ;$$

$$D_{11} = 2(m_2 - n_2) .$$

Интеграл Мичелла используется в двух формах: 1) собственный интеграл Мичелла, 2) интеграл Мичелла в форме Г.Е.Павленко. В первом случае в интегралы для окончностей входят производные уравнения обводов, а интеграл для цилиндрической вставки обращается в нуль. Во втором случае в интегралы для окончностей и для цилиндрической вставки входят сами уравнения обводов. Интеграл Мичелла в форме Г.Е. Павленко считался более удобным для расчётов, потому что с теоретического чертежа легче снимать ординаты, чем получать их производные.

Интеграл Мичелла в форме Г.Е.Павленко записывается в виде

$$R_w = \frac{4\rho g^4}{\pi V^6} \left(\frac{L}{2}\right)^2 \left(\frac{B}{2}\right)^2 \int_0^{\pi/2} [G^2(\theta) + H^2(\theta)] \sec^5 \theta d\theta, \quad (\text{П1.8})$$

где
$$G(\theta) = \int_{-1}^1 \int_0^{z(x)} f(x, z) e^{-\rho z} \sin kx dz dx,$$

$$H(\theta) = \int_{-1}^1 \int_0^{z(x)} f(x, z) e^{-\rho z} \cos kx dz dx. \quad (\text{П1.9})$$

Здесь интегралы (П1.9) зависят только от осадки и коэффициентов, определяющих форму корпуса судна. Функции $G(\theta)$ и $H(\theta)$ в данном случае записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} G(\theta) &= \int_{x_s}^{x_b} (L_1 + L_2 x + L_3 x^2) \sin kx dx, \\ H(\theta) &= \int_{x_s}^{x_b} (L_1 + L_2 x + L_3 x^2) \cos kx dx, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.10}) \text{ где}$$

индекс b относится к граничному шпангоуту в носу, а индекс s - в корме. L_1, L_2, L_3 после выполнения интегрирования по z имеют вид

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{D_1}{D_{11}^2} F_1 + \left(\frac{D_2}{D_{11}^2} - \frac{3D_{10} D_1}{D_{11}^3} \right) F_2 + \\ &\left(\frac{D_3}{D_{11}^2} - \frac{2D_{10} D_2}{D_{11}^3} + \frac{3D_{10}^2 D_1}{D_{11}^4} \right) F_3 + \\ &\left(\frac{D_9}{D_{11}} - \frac{D_{10} D_3}{D_{11}^2} + \frac{D_{10}^2 D_2}{D_{11}^3} - \frac{D_{10}^3 D_1}{D_{11}^4} \right) F_4 ; \\ L_2 &= \frac{D_6}{D_{11}^2} F_2 + \left(\frac{D_4}{D_{11}^2} - \frac{2D_{10} D_6}{D_{11}^3} \right) F_3 + \\ &\left(\frac{D_8}{D_{11}} - \frac{D_{10} D_4}{D_{11}^2} + \frac{D_{10}^2 D_6}{D_{11}^3} \right) F_4 ; \\ L_3 &= \frac{D_5}{D_{11}^2} F_3 + \left(\frac{D_7}{D_{11}} - \frac{D_{10} D_5}{D_{11}^2} \right) F_4 . \end{aligned} \quad (\text{П1.11})$$

После выполнения интегрирования по x функции (П1.10) принимаются в виде

$$\left. \begin{aligned} G &= L_1 S_1 + L_2 S_2 + L_3 S_3 , \\ H &= L_1 Q_1 + L_2 Q_2 + L_3 Q_3 , \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1.12})$$

где

$$\begin{aligned}
S_1 &= \frac{\cos k x_s - \cos k x_b}{k}; \\
S_2 &= \frac{\sin k x_b - \sin k x_s}{k^2} - \frac{x_b \cos k x_b - x_s \cos k x_s}{k}; \\
S_3 &= \frac{2(x_b \sin k x_b - x_s \cos k x_s)}{k^2} - \left(\frac{x_b^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \cos k x_b + \\
&\quad \left(\frac{x_s^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \cos k x_s; \\
Q_1 &= \frac{\sin k x_b - \sin k x_s}{k}; \\
Q_2 &= \frac{\cos k x_b - \cos k x_s}{k^2} + \frac{x_b \sin k x_b - x_s \sin k x_s}{k}; \\
Q_3 &= \frac{2(x_b \cos k x_b - x_s \cos k x_s)}{k^2} + \left(\frac{x_b^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \sin k x_b - \\
&\quad \left(\frac{x_s^2}{k} - \frac{2}{k^3}\right) \sin k x_s.
\end{aligned}
\tag{П1.13}$$

Для цилиндрической вставки эти функции равны

$$G_c = K \left(\frac{\sin k x_b}{k} - \frac{\sin k x_s}{k} \right); \tag{П1.14}$$

$$H_c = K \left(\frac{\cos k x_s}{k} - \frac{\cos k x_b}{k} \right),$$

где

$$K = A_0 K_0 + A_1 K_1 + A_2 K_2 + A_3 K_3 + A_4 K_4, \tag{П1.15}$$

$$K_0 = \frac{1}{p} (1 - e^{-pT});$$

$$K_1 = \frac{1}{p^2} [1 - e^{-pT} (pT + 1)];$$

$$K_2 = \frac{2}{p^3} - e^{-pT} \left(\frac{T^2}{p} + \frac{2T}{p^2} + \frac{2}{p^3} \right);$$

$$\begin{aligned}
 K_3 &= \frac{3}{\rho} K_2 - \frac{T^3}{\rho} e^{-\rho T}; \\
 K_4 &= \frac{4}{\rho} K_3 - \frac{T^4}{\rho} e^{-\rho T}.
 \end{aligned}
 \tag{П1.16}$$

Для расчётов и анализа удобно записать формулы (П1.11) в виде

$$\left. \begin{aligned}
 L_1 &= a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3, \\
 L_2 &= a_4 F_2 + a_5 F_3; \\
 L_3 &= a_6 F_2,
 \end{aligned} \right\}
 \tag{П1.17}$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 F_1 &= \frac{1 - e^{-\rho T/L} - \rho (T/L) e^{-\rho T/L}}{\rho^2 (T/L)^2}; \\
 F_2 &= \frac{1 - e^{-\rho T/L}}{\rho (T/L)}; \\
 F_3 &= e^{-\rho T/L} \{ Ei[-(\alpha + 1) \rho T/L] - Ei(-\alpha \rho T/L) \}.
 \end{aligned} \right\}
 \tag{П1.18}$$

Выражения при F_4 во всех формулах (П1.11) получаются равными нулю, поэтому определять эту функцию нет необходимости.

Коэффициенты, входящие в формулы (П1.17), определяются через параметры, входящие в уравнения ватерлиний

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{n_0 - m_0}{t_2 - t_1} + \frac{(m_1 - n_1)^2}{4(m_2 - n_2)(t_2 - t_1)} ; \\
a_2 &= \frac{m_0 t_2 - n_0 t_1}{t_2 - t_1} + \frac{(m_1 - n_1)^2 (n_2 t_1 - m_2 t_2)}{4 (m_2 - n_2)^2 (t_2 - t_1)} ; \\
a_3 &= \frac{m_2 n_2 (m_1 - n_1)^2 (t_2 - t_1)}{4 (m_2 - n_2)^3} ; \\
a_4 &= \frac{m_1 n_2 - n_1 m_2}{m_2 - n_2} ; \\
a_5 &= \frac{m_2 n_2 (m_1 - n_1) (t_2 - t_1)}{(m_2 - n_2)^2} ; \\
a_6 &= \frac{m_2 n_2 (t_2 - t_1)}{(m_2 - n_2)} ; \\
a_7 &= \frac{n_2 t_2 - m_2 t_1}{m_2 - n_2} .
\end{aligned} \tag{П1.19}$$

Для упрощения исследований целесообразно верхнюю кромочную ватерлинию выбирать при $t=0$, т.е. совпадающую с ГВЛ. В этом случае все формулы упрощаются и записываются так

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{n_0 - m_0}{t_2} + \frac{(m_1 - n_1)^2}{4(m_2 - n_2) t_2} ; \\
a_2 &= m_0 + \frac{(m_1 - n_1)^2 m_2}{4 (m_2 - n_2)^2} ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_3 &= \frac{m_2 (m_1 - n_1)^2}{4 (m_2 - n_2)^3} ; \\
 a_4 &= \frac{m_1 n_2 - n_1 m_2}{m_2 - n_2} ; \\
 a_5 &= \frac{m_2 (m_1 - n_1)}{(m_2 - n_2)^2} ; \\
 a_6 &= m_2 ; \\
 a_7 &= \frac{n_2 t_2}{m_2 - n_2} .
 \end{aligned}
 \tag{П1.20}$$

Для интеграла Мичелла формулы (П1.17) упрощаются и записываются так:

$$\left. \begin{aligned}
 L_2 &= a_4 F_2 + a_5 F_3 ; \\
 L_3 &= a_6 F_3 ,
 \end{aligned} \right\}
 \tag{П1.21}$$

потому что интегралы (П1.5) определяются по формулам

$$I(\theta) = L_2 S_1 + 2 L_3 S_2 ,
 \tag{П1.22}$$

$$J(\theta) = L_2 Q_1 + 2 L_3 Q_2 .$$

Входящие в них функции определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned}
 F_2 &= \frac{1 - e^{-\rho_0 T/L}}{\rho_0 (T / L)} ; \\
 F_3 &= a_7 e^{a_7 \rho_0 T/L} \{ Ei[-(a_7 + 1) \rho_0 T / L] - Ei(-a_7 \rho_0 T / L) \} .
 \end{aligned} \right\}
 \tag{П1.23}$$

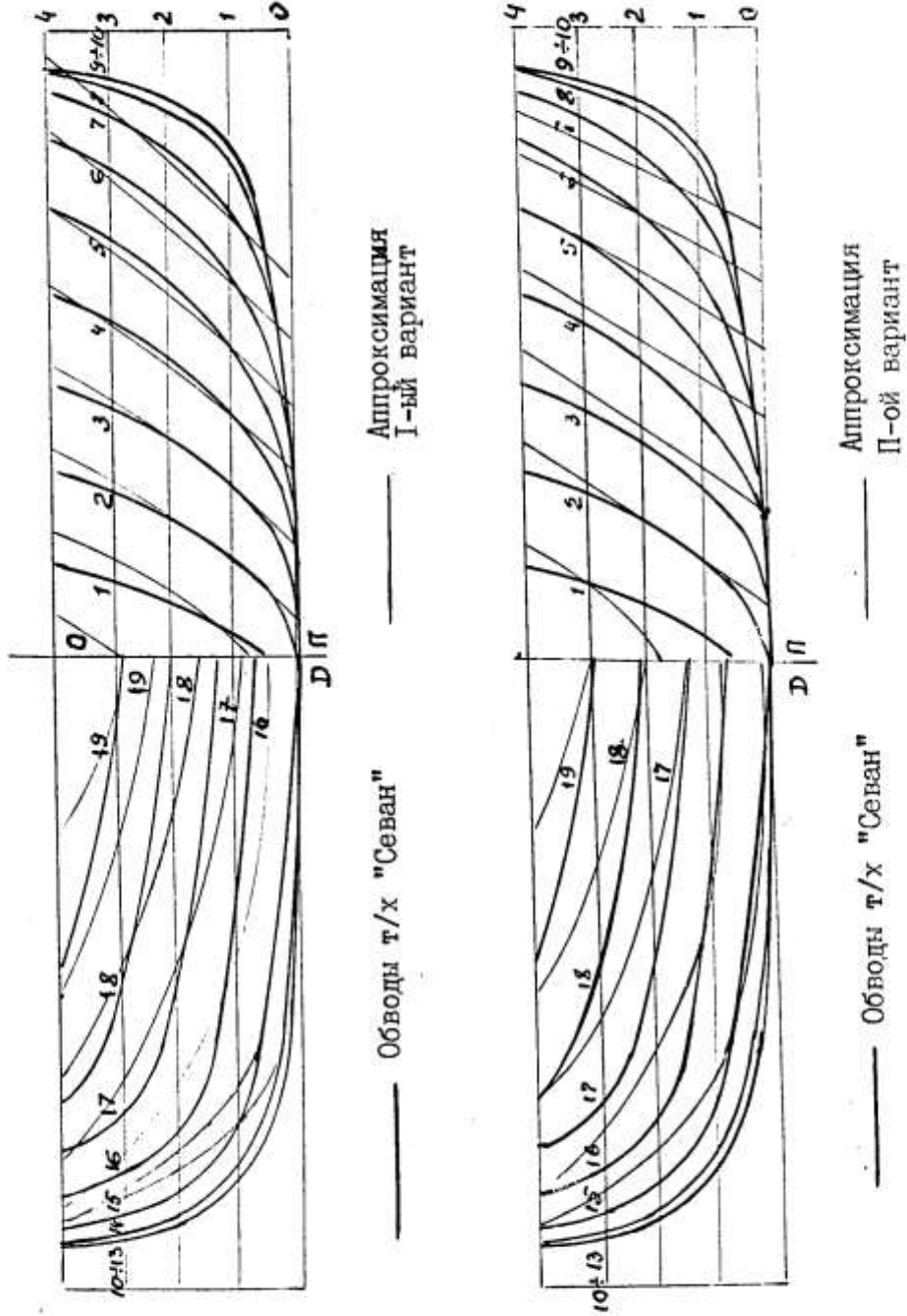


Рис. П1.1. Аппроксимация обводов модели судна "Севан"

где

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{\cos k x_s - \cos k x_b}{k}; \\
 S_2 &= \frac{\sin k x_b - \sin k x_s}{k^2} - \frac{x_b \cos k x_b - x_s \cos k x_s}{k}; \\
 Q_1 &= \frac{\sin k x_b - \sin k x_s}{k}; \\
 Q_2 &= \frac{\cos k x_b - \cos k x_s}{k^2} + \frac{x_b \sin k x_b - x_s \sin k x_s}{k}.
 \end{aligned}
 \tag{П1.24}$$

Для исследований использованы варианты аналитически заданных обводов речного судна “Севан”, спроектированных из развёртывающихся поверхностей. Модель этого судна была испытана в опытовом бассейне ГИИВТа. Для этих обводов получены приближённые уравнения в виде уравнения (П1.2). В связи с тем, что получить в таком виде точное совпадение с поверхностью корпуса невозможно, для расчётов использовались две аппроксимации. В одном случае получено лучшее приближение по форме, но плохое согласование с переходом на цилиндрическую вставку, а во втором сделано наоборот. Соотношение между обводами, полученными по уравнению (П1.2) и испытанными в бассейне, показано на рис. П1.1.

Экспериментальные кривые берутся для сравнения при проведении анализа допущений Мичелла и особенностей интегралов в виде собственно Мичелла и Мичелла в форме Г.Е.Павленко.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТАБЛИЦА П2.1

Расчёт вызванных скоростей по Хессу-Смиту

№ точки	X	Y	Z	V_x
1	32,343	0,01333	0,03800	0,17777
2	31,867	0,05611	0,16566	0,27771
3	31,293	0,32948	0,25651	0,24587
4	31,207	0,26667	0,53667	0,11106
5	30,711	0,43955	0,25116	0,05351
6	30,726	0,27236	0,60902	-0,01819
7	30,070	0,38500	0,68964	0,18827
8	30,059	0,16460	0,68964	0,15228
9	29,967	0,03000	0,96267	0,12643
10	29,450	0,52263	0,23739	0,09449
11	29,450	0,28264	0,71240	0,08332
12	29,407	0,07918	1,07350	0,08088
13	28,850	0,65500	0,23750	0,07419
14	28,830	0,40764	0,71241	0,07419
15	28,812	0,14470	1,15410	0,06691
16	28,727	0,01000	1,33030	0,04322
17	28,210	0,53500	0,23739	0,06444
18	28,210	0,53500	0,71250	0,06119
19	28,210	0,24265	1,18740	0,06398
20	28,084	0,05624	1,47780	0,10079
21	27,590	0,92000	0,23750	0,05536
22	27,590	0,66500	0,71250	0,05009
23	27,589	0,36766	1,18740	0,04317
24	27,560	0,10788	1,57640	0,03687
25	26,970	1,05260	0,23739	0,05099
26	26,969	0,79265	0,71241	0,04186
27	26,970	0,49000	1,18750	0,03590
28	26,956	0,16657	1,63960	0,02847
29	26,350	1,18500	0,23750	0,04240
30	26,350	0,92000	0,71250	0,03656
31	26,349	0,61270	1,18740	0,02924
32	26,356	0,26830	1,65220	0,01918
33	26,247	0,07000	1,88570	-0,03593
34	25,729	1,31530	0,23730	0,03965
35	25,730	1,04500	0,71250	0,02937

Продолжение таблицы П2.1

№ точки	X	Y	Z	V_x
36	25,729	0,73260	1,18740	0,01972
37	25,731	0,40240	1,64110	0,06411
38	25,727	0,16340	1,87850	-0,02837
39	25,663	0,04840	1,90000	-0,02389
40	25,110	1,44500	0,23750	0,03691
41	25,109	1,16770	0,71240	0,03052
42	25,110	0,85000	1,18750	0,02219
43	25,112	0,51970	1,63490	0,00836
44	25,108	0,2797	1,86990	-0,02292
45	25,079	0,10210	1,89730	-0,01253
46	23,245	1,83100	0,23750	0,02777
47	23,243	1,53900	0,71250	0,01902
48	23,245	1,20600	1,18750	0,00982
49	23,276	0,87010	1,61740	-0,00192
50	23,121	0,63450	1,84740	-0,03047
51	22,997	0,27190	1,8935	-0,02167
52	20,143	2,46400	0,23750	0,02107
53	20,145	2,1460	0,71250	0,01300
54	20,142	1,78900	1,18740	0,00473
55	20,187	1,44820	1,58940	-0,00653
56	20,047	1,15950	1,8160	-0,02659
57	20,031	0,499620	1,89060	-0,01899
58	17,043	3,07900	0,23750	0,01511
59	17,045	2,73600	0,7150	0,00783
60	17,045	2,35000	1,18570	-0,00008
61	17,126	2,01820	1,55420	-0,00984
62	17,005	1,70350	1,77610	-0,00262
63	16,952	0,74880	1,88580	-0,02018
64	13,945	3,67600	0,23750	0,00933
65	13,942	3,30900	0,71250	0,00252
66	13,947	2,90800	1,18750	-0,00449
67	14,024	2,59400	1,52040	-0,01356
68	13,865	2,24850	1,73730	-0,02607
69	13,898	0,98070	1,88090	-0,02150
70	10,842	4,25900	0,23750	-0,00487

Продолжение таблицы П2.1

№ точки	X	Y	Z	V_x
71	10,845	3,86600	0,71250	-0,01006
72	10,842	3,44390	1,18750	-0,01536
73	11,0010	3,13820	1,49060	-0,02077
74	10,890	2,79650	1,69300	-0,03219
75	10,777	1,26090	1,86510	-0,02498
76	7,808	4,60510	0,23760	-0,03676
77	7,812	4,32220	0,71280	-0,02770
78	7,761	3,96810	1,18750	-0,02390
79	7,555	3,70740	1,48600	-0,03574
80	7,671	3,27200	1,66880	-0,037180
81	7,738	1,46530	1,84640	-0,02460
82	4,650	4,67000	0,23750	-0,03073
83	4,6500	4,52000	0,71250	-0,03072
84	4,6500	4,23500	1,18750	-0,03004
85	4,6500	3,91500	1,49650	-0,02880
86	4,650	3,40000	1,67450	-0,02690
87	4,650	1,50000	1,84050	-0,02019
88	1,550	4,67000	0,23750	-0,01507
89	1,550	4,52000	0,71280	-0,01506
90	1,550	4,23500	1,18750	-0,01502
91	1,550	2,91500	1,49650	-0,01500
92	1,550	3,40000	1,67450	-0,01500
93	1,550	1,50000	1,84050	-0,01483
94	-1,550	4,67000	0,23750	-0,012760
95	-1,550	4,52000	0,71250	-0,01279
96	-1,550	4,23500	1,18750	-0,012830
97	-1,550	3,91500	1,49650	-0,01286
98	-1,550	3,40000	1,67450	-0,01298
99	-1,550	1,50000	1,84050	-0,01322
100	-4,650	4,67000	0,23750	-0,013400
101	-4,650	4,52000	0,71250	-0,01344
102	-4,650	4,2350	1,18750	-0,01350
103	-4,650	3,91500	1,49650	-0,01358
104	-4,650	3,40000	1,67450	-0,01372
105	-4,650	1,50000	1,84050	-0,01408

Продолжение таблицы П2.1

№ точки	X	Y	Z	V_x
106	-7,750	4,67000	0,23750	-0,01737
107	-7,750	4,52000	0,71250	-0,01741
108	-7,750	4,2350	1,18750	-0,01747
109	-7,750	3,91500	1,49650	-0,01755
110	-7,750	3,40000	1,67450	-0,01772
111	-7,750	1,50000	1,84050	-0,01809
112	-10,850	4,67000	0,23750	-0,03672
113	-10,850	4,52000	0,71250	-0,03662
114	-10,850	4,23500	1,18750	-0,03603
115	-10,850	3,91500	1,49650	-0,03523
116	-10,850	3,40000	1,67450	-0,03434
117	-10,850	1,50000	1,84050	-0,02979
118	-12,711	4,64490	0,23760	-0,06277
119	-12,710	4,48740	0,71260	-0,06348
120	-12,710	4,20000	1,18750	-0,06890
121	-12,731	3,84290	1,50910	-0,06808
122	-12,715	3,27260	1,69260	-0,06506
123	-12,705	1,42640	1,84640	-0,04130
124	-13,330	4,60000	0,23750	-0,04879
125	-13,331	4,42990	0,71260	-0,05454
126	-13,332	4,12720	1,18760	-0,05969
127	-13,331	3,73230	1,52000	-0,063510
128	-13,338	3,06010	1,71000	-0,06072
129	-13,325	1,28850	1,85250	-0,04984
130	-13,952	4,55220	0,23770	-0,03506
131	-13,951	4,35980	0,71270	-0,03494
132	-13,952	4,02930	1,18770	-0,04422
133	-13,953	3,606600	1,52000	-0,05473
134	-13,954	2,86860	1,71000	-0,05353
135	-13,944	1,16360	1,85250	-0,05020
136	-14,570	4,50750	0,23750	-0,02685
137	-14,573	4,27690	0,71290	-0,02451
138	-14,573	3,90160	1,18780	-0,02701
139	-14,572	3,44440	1,52000	-0,04595
140	-14,571	2,66970	1,71000	-0,05160

Продолжение таблицы П2. 1

№ точки	X	Y	Z	V_x
141	-14,565	1,05080	1,85030	-0,05218
142	-15,190	4,47000	0,23750	-0,03773
143	-15,194	4,19920	0,71300	-0,02935
144	-15,193	3,76150	1,18780	-0,02034
145	-15,194	3,26370	1,52000	-0,04490
146	-15,185	2,49890	1,71000	-0,06522
147	-15,187	0,97520	1,84680	-0,06271
148	-15,814	4,40930	0,23800	-0,01083
149	-15,809	4,10260	0,71240	-0,02237
150	-15,814	3,61620	1,18790	-0,01500
151	-15,817	3,0572	1,52010	-0,04380
152	-15,814	2,2653	1,71000	-0,07370
153	-15,799	0,86540	1,83920	-0,07392
154	-16,430	4,35000	0,23750	-0,00069
155	-16,433	4,01210	0,71270	-0,00507
156	-16,436	3,46500	1,18810	-0,01487
157	-16,438	2,80840	1,52010	-0,03437
158	-16,446	1,83010	1,71020	-0,05354
159	-16,397	0,60740	1,82470	-0,07117
160	-17,051	4,31240	0,23760	-0,01918
161	-17,053	3,93930	0,71280	-0,01758
162	-17,057	3,29430	1,18820	-0,01225
163	-17,057	2,51340	1,52010	-0,02557
164	-17,062	1,26960	1,70740	-0,03744
165	-16,947	0,26670	1,80830	-0,07017
166	-17,672	4,26730	0,23760	-0,02259
167	-17,673	3,84920	0,71280	-0,01517
168	-17,673	3,84920	1,18810	-0,09197
169	-17,683	2,15070	1,52020	-0,01664
170	-17,654	0,86590	1,68730	-0,02288
171	-18,292	4,20720	0,23760	-0,01550
172	-18,294	3,74140	0,71280	-0,00794
173	-18,294	3,74140	1,18810	-0,00234
174	-18,298	1,74390	1,52010	-0,01768
175	-18,268	0,61150	1,65820	-0,02686

Продолжение таблицы П2.1

№ точки	X	Y	Z	V_x
---------	---	---	---	-------

176	-18,912	4,13960	0,23770	-0,01265
177	-18,914	3,62130	0,71280	-0,00516
178	-18,916	2,62840	1,18800	-0,00032
179	-18,930	1,19190	1,52160	-0,00003
180	-18,807	0,31670	1,83830	-0,02847
181	-19,533	4,06190	0,23770	-0,00888
182	-19,534	3,48350	0,71290	0,00150
183	-19,536	2,35280	1,18800	0,00490
184	-19,517	0,79430	1,51290	-0,00072
185	-20,152	3,96940	0,23770	-0,00014
186	-20,154	3,32840	0,71290	0,00733
187	-20,156	2,05030	1,18800	0,00633
188	-20,131	0,59130	1,49080	-0,01245
189	-20,773	3,86680	0,23770	0,00359
190	-20,774	3,16070	0,71290	0,01014
191	-20,776	1,72500	1,18790	0,00886
192	-20,737	0,37710	1,46520	-0,00869
193	-21,393	3,75170	0,23760	0,01102
194	-21,394	2,97560	0,71290	0,01499
195	-21,394	2,97560	0,71290	0,01499
196	-21,493	0,08340	1,46520	0,00069
197	-22,013	3,62670	0,23770	0,01350
198	-22,015	2,77240	0,71290	0,01742
199	-22,004	1,12370	1,17280	0,01596
200	-22,633	3,48890	0,23780	0,02016
201	-22,634	2,55280	0,71280	0,01941
202	-22,623	0,98650	1,14290	0,00709
203	-23,253	3,33890	0,23770	0,00232
204	-23,254	2,32020	0,71820	0,01847
205	-23,241	0,84430	1,11060	0,00722
206	-23,873	3,17880	0,23760	0,02717
207	-23,874	2,07240	0,71280	0,02066
208	-23,858	0,69290	1,07570	0,01180
209	-24,493	3,00610	0,23780	0,03071
210	-24,494	1,80470	0,71280	0,02448

Продолжение таблицы П2.1.

№ точки	X	Y	Z	V_x
---------	---	---	---	-------

211	-24,473	0,52950	1,04210	0,01536
212	-25,113	2,82370	0,23770	0,03389
213	-25,114	1,52480	0,71280	0,02597
214	-25,084	0,35980	1,01240	0,01325
215	-25,733	2,62830	0,23780	0,03693
216	-25,734	1,22700	0,71280	0,03247
217	-25,672	0,18770	0,98430	0,01489
218	-26,353	2,42100	0,23770	0,04027
219	-26,347	0,97560	0,70270	0,03174
220	-26,247	0,05000	0,94670	0,02360
221	-26,973	2,20060	0,23780	0,04269
222	-26,961	0,80890	0,67200	0,03429
223	-27,592	1,97100	0,23770	0,04448
224	-27,579	0,67460	0,63190	0,03564
225	-28,213	1,73060	0,23780	0,04560
226	-28,196	0,53550	0,59230	0,04088
227	-28,833	1,47830	0,23770	0,04782
228	-28,810	0,38990	0,55600	0,03963
229	-29,453	1,21290	0,23780	0,04916
230	-29,414	0,23930	0,52450	0,03645
231	-30,072	0,94340	0,23400	0,05804
232	-29,967	0,10000	0,49000	0,04172
233	-30,682	0,75130	0,21060	0,05820
234	-31,298	0,62240	0,16840	0,06110
235	-31,911	0,47030	0,12620	0,07669
236	-32,529	0,31950	0,08870	0,08008
237	-33,125	0,18580	0,05070	0,08765
238	-33,587	0,06670	0,01660	0,12288

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПОТЕНЦИАЛ ИСТОЧНИКА С ИСКЛЮЧЕНИЕМ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

В интегральном выражении для потенциала волнового источника выполняется интегрирование по всем волновым числам k . Для того, чтобы проверить не является ли причиной осцилляций расчётных волн наличие капиллярных, выполнено следующее исследование.

Длина капиллярных волн меньше $\lambda=0,11\text{ м}$. Это соответствует волновым числам $k_g \approx 57 - 60$. Следовательно, все волновые числа от 60 до ∞ относятся к очень маленьким капиллярным волнам. Из предположения, что они искажают картину обычных гравитационных волн получен потенциал источника с исключением волн, у которых волновое число больше k_g . Затем, используя полученный потенциал, выведено новое выражение для интеграла Мичелла.

Исходное выражение для потенциала источника записывается в виде

$$\phi = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{k_g} e^{-k(f+z) + ik\varpi} dk -$$

$$\frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{k_g} e^{-k(f-z) + ik\varpi} dk - \quad (\text{П3.1})$$

$$\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{k_g} \frac{e^{-k(f-z) + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk,$$

где $\varpi = (x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta$. (П3.2)

Волновое сопротивление определяется по формуле

$$R = \lim_{\mu \rightarrow 0} \mu \rho \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi \frac{\partial \phi}{\partial z} dx dy. \quad (\text{П3.3})$$

Производная по z на $z=0$ определяется по формуле

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ddot{y}} = - \frac{m}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{k_g} \frac{k^2 e^{-kf + ik\tau}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk.$$

(П3.4)

Формула (П3.1) может быть записана в виде

$$\phi = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-k(f+z) + ik\tau} dk - \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-k(f-z) + ik\tau} dk -$$

$$\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-k(f-z) + ik\tau}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk$$

$$- \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{k_g}^{\infty} e^{-k(f+z) + ik\tau} dk + \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{k_g}^{\infty} e^{-k(f-z) + ik\tau} dk +$$

$$\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_{k_g}^{\infty} \frac{e^{-k(f-z) + ik\tau}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk.$$

(П3.5)

Для приведения последних трёх интегралов к удобному для интегрирования виду в них делается замена переменной интегрирования k на $k - k_g$. Тогда выражение (П3.5) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
\phi &= \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-k(f+z) + ik\varpi} dk - \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-k(f-z) + ik\varpi} dk - \\
&\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-k(f-z) + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk - \\
&-\frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-(k-k_g)(f+z) + i(k-k_g)\varpi} dk + \\
&\frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} e^{-(k-k_g)(f-z) + i(k-k_g)\varpi} dk + \\
&\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-(k-k_g)(f-z) + i(k-k_g)\varpi}}{(k - k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk.
\end{aligned}
\tag{П3.6}$$

Аналогично для производной по z получается

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \phi}{\partial z} &= \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} (-k) e^{-k(f+z) + ik\varpi} dk - \\
&\frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} k e^{-k(f-z) + ik\varpi} dk - \\
&\frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{ke^{-k(f-z) + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} (k - k_g) e^{-(k-k_g)(f+z) + i(k-k_g)\varpi} dk + \\
& \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} (k - k_g) e^{-(k-k_g)(f-z) + i(k-k_g)\varpi} dk + \\
& \frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{(k - k_g) e^{-(k-k_g)(f-z) + i(k-k_g)\varpi}}{(k - k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk.
\end{aligned} \tag{П3.7}$$

В формулу (П3.3) необходимо подставить значение потенциала и его производной по z на свободной поверхности, то есть при $z=0$. Тогда

$$\begin{aligned}
\phi = & - \frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-kf + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk + \\
& \frac{m k_0}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-(k-k_g)f + i(k-k_g)\varpi}}{(k - k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk.
\end{aligned} \tag{П3.8}$$

При определении производной потенциала по z подынтегральное выражение приводится к общему знаменателю, в котором затем отбрасывается мнимая часть за счёт того, что μ устремляется к нулю. Тогда

$$\phi_z(x, y, 0) = - \frac{m}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{k^2 e^{-kf + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk +$$

$$\frac{m}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{(k-k_g)^2 e^{-(k-k_g)f + i(k-k_g)\varpi}}{(k-k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk \quad (\text{П3.9})$$

Источники распределяются по поверхности корпуса судна, а затем к полученным выражениям применяются кратные ряды Фурье. Потенциал скорости тогда записывается в виде

$$\begin{aligned} \phi = & -\frac{k_0}{\pi} \iint_S \sigma dS \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-kf + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk + \\ & \frac{k_0}{\pi} \iint_S \sigma dS \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{e^{-(k-k_g)f + i(k-k_g)\varpi}}{(k-k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk. \end{aligned} \quad (\text{П3.10})$$

Производная также имеет вид

$$\begin{aligned} \phi_z(x, y, 0) = & -\frac{1}{\pi} \iint_S \sigma dS \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{k^2 e^{-kf + ik\varpi}}{k - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk + \\ & \frac{1}{\pi} \iint_S \sigma dS \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{(k-k_g)^2 e^{-(k-k_g)f + i(k-k_g)\varpi}}{(k-k_g) - k_0 \sec^2 \theta + i\mu \sec \theta} dk. \end{aligned} \quad (\text{П3.11})$$

Если действительную часть выражения (П3.10) представить в виде суммы двух потенциалов

$$\phi = \phi_0 + \phi_g, \quad (\text{П3.12})$$

тогда слагаемые определяются по формулам

$$\begin{aligned}
\phi_0 = & \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \{ F_1 \cos(kx \cos \theta) \cos(ky \sin \theta) + \\
& F_2 \sin(kx \cos \theta) \cos(ky \sin \theta) + \\
& F_3 \cos(kx \cos \theta) \sin(ky \sin \theta) + \\
& F_4 \sin(kx \cos \theta) \sin(ky \sin \theta) \} k dk,
\end{aligned} \tag{П3.13}$$

где

$$\begin{aligned}
F_1 = & -\{ (k - k_0 \sec^2 \theta) \cdot (P_e - P_0) - \mu \sec \theta (Q_e + Q_0) \} D, \\
F_2 = F_3 = & -\{ (k - k_0 \sec^2 \theta) \cdot (Q_e + Q_0) - \\
& \mu \sec \theta (P_e - P_0) \} D, \\
F_4 = & -\{ (k - k_0) \cdot (P_0 - P_e) + \mu \sec \theta (Q_e + Q_0) \} D,
\end{aligned} \tag{П3.14}$$

где

$$D = \frac{k_0 \sec^2 \theta}{\pi k \{ (k - k_0 \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta \}}, \tag{П3.15}$$

где

$$\begin{aligned}
P_e = & \iint_S \sigma e^{-kf} \cos(kx_0 \cos \theta) \cos(ky_0 \sin \theta) dS, \\
P_0 = & \iint_S \sigma e^{-kf} \sin(kx_0 \cos \theta) \sin(ky_0 \sin \theta) dS, \\
Q_e = & \iint_S \sigma e^{-kf} \sin(kx_0 \cos \theta) \cos(ky_0 \sin \theta) dS,
\end{aligned}$$

$$Q_e = \iint_S \sigma e^{-kf} \cos(kx_0 \cos \theta) \sin(ky_0 \sin \theta) dS \quad (\text{ПЗ.16})$$

Для производной по z выражения получаются аналогично и имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_0}{\partial z} = & \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \{ G_1 \cos(kx \cos \theta) \cos(ky \sin \theta) + \\ & G_2 \sin(kx \cos \theta) \cos(ky \sin \theta) + \\ & G_3 \cos(kx \cos \theta) \sin(ky \sin \theta) + \\ & G_4 \sin(kx \cos \theta) \sin(ky \sin \theta) \} k dk, \end{aligned} \quad (\text{ПЗ.17})$$

где

$$\begin{aligned} G_1 = F_1 \frac{D_1}{D}; \quad G_2 = F_2 \frac{D_1}{D}; \\ G_3 = F_3 \frac{D_1}{D}, \quad G_4 = F_4 \frac{D_1}{D}, \end{aligned} \quad (\text{ПЗ.18})$$

где

$$D_1 = \frac{k}{\pi \{ (k - k_0 \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta \}}. \quad (\text{ПЗ.19})$$

Тогда вторые части потенциала и его производной получаются в таком же виде, но вместо переменной интегрирования k всюду стоит $(k - k_0)$.

$$\phi_g = \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \{ F_{1g} \cos[(k - k_0)x \cos \theta] \cos[(k - k_0)y \sin \theta] +$$

$$\begin{aligned}
& F_{2g} \sin [(k - k_g) x \cos \theta] \cos [(k - k_g) y \sin \theta] + \\
& F_{3g} \cos [(k - k_g) x \cos \theta] \sin [(k - k_g) y \sin \theta] + \\
& F_{4g} \sin [(k - k_g) x \cos \theta] \sin [(k - k_g) y \sin \theta] \} k dk,
\end{aligned}
\tag{П3.20}$$

где

$$\begin{aligned}
F_{1g} &= \{ (k - k_g - k_o \sec^2 \theta) \cdot (P_{eg} - P_{og}) - \\
&\quad \mu \sec \theta (Q_{eg} + Q_{og}) \} D_g, \\
F_{2g} &= F_{3g} = \{ (k - k_g - k_o \sec^2 \theta) \cdot (Q_{eg} + Q_{og}) - \\
&\quad \mu \sec \theta (P_{eg} - P_{og}) \} D_g, \\
F_{4g} &= -\{ (k - k_g - k_o \sec^2 \theta) \cdot (P_o - P_\theta) + \\
&\quad \mu \sec \theta (Q_e + Q_o) \} D_g,
\end{aligned}
\tag{П3.21}$$

где

$$D_g = \frac{k_o \sec^2 \theta}{\pi (k - k_g) \{ (k - k_g - k_o \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta \}},
\tag{П3.22}$$

$$P_{eg} = \iint_S \sigma e^{-(k-k_g)f} \cos [(k - k_g) x_o \cos \theta] \times \\
\cos [(k - k_g) y_o \sin \theta] dS,$$

$$P_{og} = \iint_S \sigma e^{-(k-k_g)f} \sin [(k - k_g) x_o \cos \theta] \times \\
\sin [(k - k_g) y_o \sin \theta] dS,$$

$$Q_{eg} = \iint_S \sigma e^{-(k-k_g)f} \sin [(k - k_g) x_o \cos \theta] \times \\
\cos [(k - k_g) y_o \sin \theta] dS,$$

$$Q_{og} = \iint_S \sigma e^{-(k-k_g)f} \cos[(k-k_g)x_0 \cos \theta] \times \\ \sin[(k-k_g)y_0 \sin \theta] dS, \quad (\text{П3.23})$$

Далее

$$\frac{\partial \phi_g}{\partial z} = \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} \{G_{1g} \cos[(k-k_g)x \cos \theta] \times \\ \cos \theta] \times \cos[(k-k_g)y \sin \theta] + \\ G_{2g} \sin[(k-k_g)x \cos \theta] \cos[(k-k_g)y \sin \theta] + \\ G_{3g} \cos[(k-k_g)x \cos \theta] \sin[(k-k_g)y \sin \theta] + \\ G_{4g} \sin[(k-k_g)x \cos \theta] \sin[(k-k_g)y \sin \theta]\} (k-k_g) dk, \quad (\text{П3.24})$$

где

$$G_{1g} = F_{1g} \frac{D_{1g}}{D_g}; \quad G_{2g} = F_{2g} \frac{D_{1g}}{D_g}; \\ G_{3g} = F_{3g} \frac{D_{1g}}{D_g}, \quad G_{4g} = F_{4g} \frac{D_{1g}}{D_g}, \quad (\text{П3.25})$$

где

$$D_{1g} = \frac{(k-k_g)}{\pi\{(k-k_g-k_0 \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta\}}. \quad (\text{П3.26})$$

Двойной интеграл по свободной поверхности получается в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi \frac{\partial \phi}{\partial z} dx dy = 4 \pi^2 \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} (F_1 G_1 + F_2 G_2 + F_3 G_3 + F_4 G_4) k dk -$$

$$4 \pi^2 \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_0^{\infty} (F_{1g} G_{1g} + F_{2g} G_{2g} + F_{3g} G_{3g} + F_{4g} G_{4g}) (k - k_g) dk.$$

(П3.27)

Отсюда формула для расчёта волнового сопротивления получается в виде

$$R = \lim_{\mu \rightarrow 0} 4 k_0 \rho \mu \left[\int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta \int_0^{\infty} \frac{k(P_e^2 + P_o^2 + Q_e^2 + Q_o^2) dk}{(k - k_0 \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta} - \right.$$

$$\left. \int_{-\pi}^{\pi} \sec^2 \theta \int_0^{\infty} \frac{(k - k_g) (P_{eg}^2 + P_{og}^2 + Q_{eg}^2 + Q_{og}^2) dk}{(k - k_g - k_0 \sec^2 \theta)^2 + \mu^2 \sec^2 \theta} \right].$$

(П3.28)

Переходя к пределу и используя теорию вычетов, а также тригонометрические формулы, можно получить, что

$$P_e^2 + P_o^2 + Q_e^2 + Q_o^2 =$$

$$\left[\iint_S \sigma e^{-k_0 z \sec^2 \theta} \cos k_0 (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \sec^2 \theta dS \right]^2 +$$

$$\left[\iint_S \sigma e^{-k_0 z \sec^2 \theta} \sin k_0 (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \sec^2 \theta dS \right]^2.$$

(П3.29)

Аналогично получается сумма квадратов

$$P_e^2 + P_o^2 + Q_e^2 + Q_o^2 =$$

$$\left\{ \iint_S \sigma e^{-(k_0+k_g)z \sec^2 \theta} \cos (k_g+k_0 \sec^2 \theta) (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) dS \right\}^2 +$$

$$\left\{ \iint_S \sigma e^{-(k_0+k_g)z \sec^2 \theta} \sin [(k_g+k_0 \sec^2 \theta) (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) dS \right\}^2 .$$

(П3.30)

Если интенсивности источников принять по Мичеллу в виде

$$2\pi\sigma = \frac{\partial f}{\partial x} C, \quad (П3.31)$$

и учесть, что $k_0 = \frac{g}{C^2}$, то расчётный интеграл волнового сопротивления в случае исключения капиллярных волн получается в виде

$$R = \frac{4 g^2 \rho}{\pi C^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [(I^2 + J^2) - (I_g^2 + J_g^2)] \frac{d\theta}{\cos^3 \theta}, \quad (П3.32)$$

где

$$I = \iint_S f'_{,x} e^{-k_0 z \sec^2 \theta} \cos (k_0 x \sec \theta) dz dx,$$

$$J = \iint_S f'_{,x} e^{-k_0 z \sec^2 \theta} \sin (k_0 x \sec \theta) dz dx,$$

$$I_g = \iint_S f'_{,x} e^{-(k_g+k_0 \sec^2 \theta)z} \cos [(k_g + k_0 \sec \theta)x] dz dx,$$

$$J_g = \iint_S f'_{,x} e^{-(k_g+k_0 \sec^2 \theta)z} \sin [(k_g + k_0 \sec \theta)x] dz dx.$$

(П3.33)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Чертежи обводов и графики результатов
расчётов волнового сопротивления
моделей Виглея и Вейнблюма

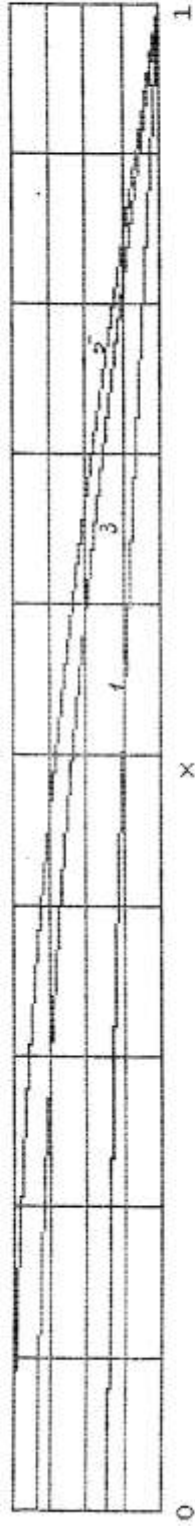
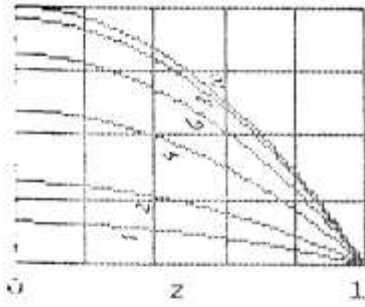


Рис. П4.1. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 829

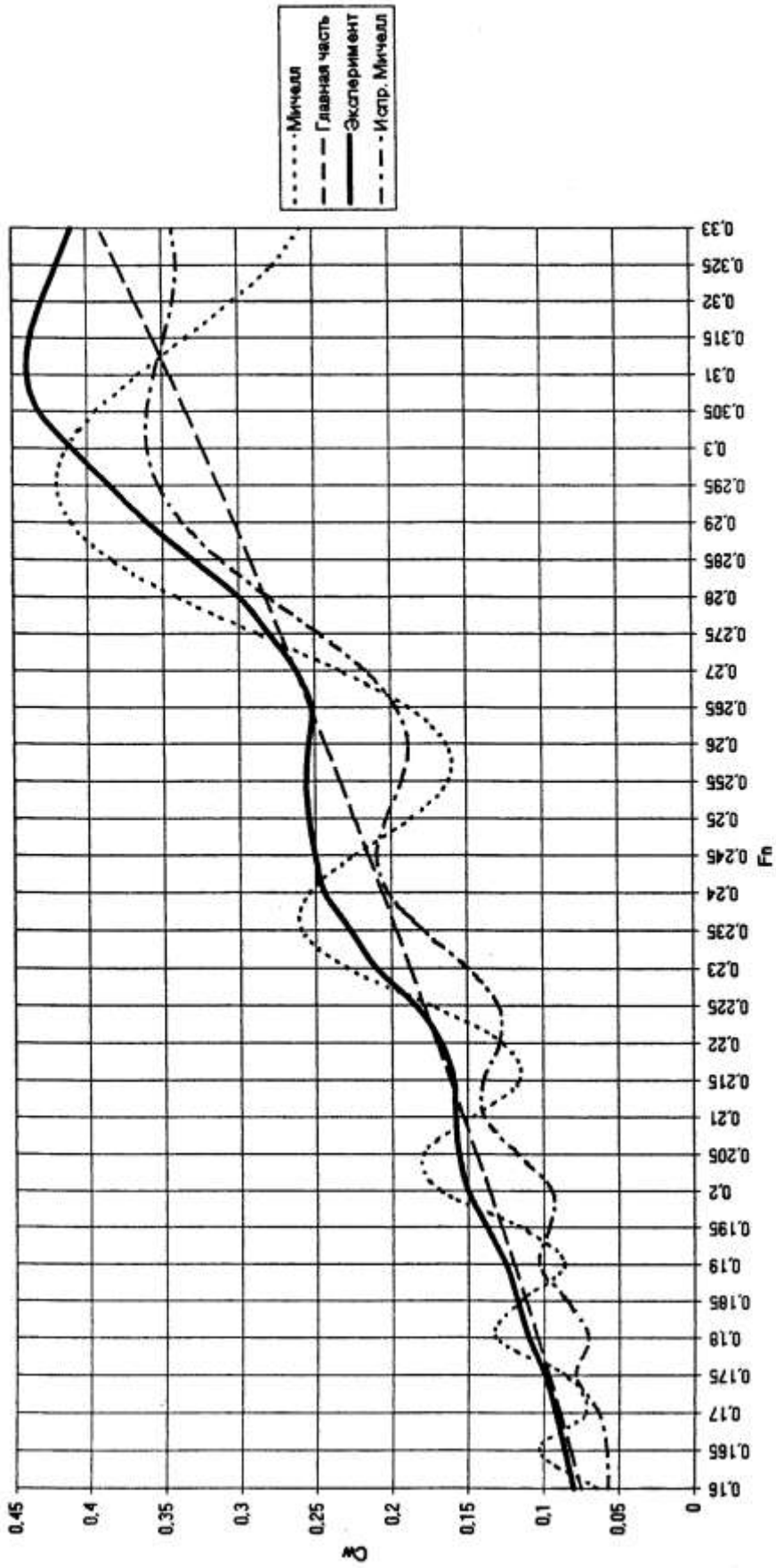


Рис. П4. 2. Модель Виглея 829

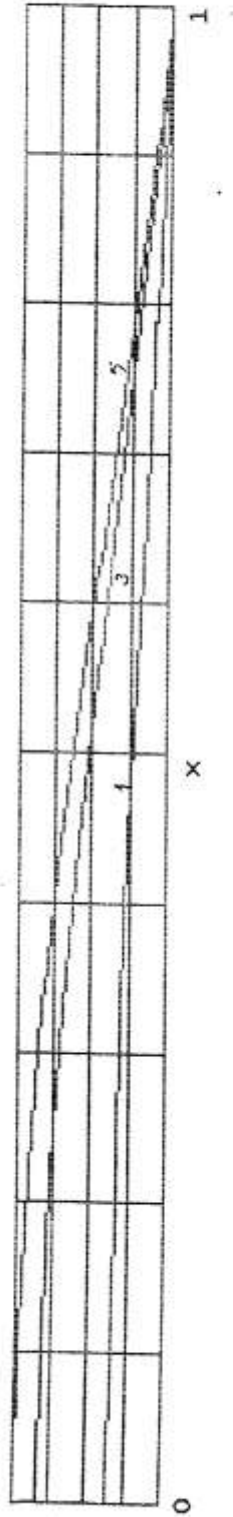
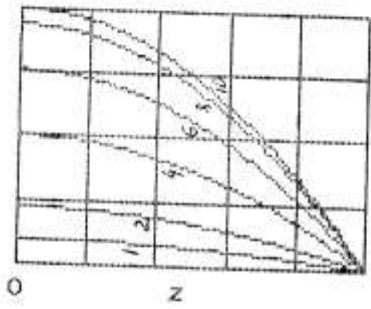


Рис. П4.3. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1805А

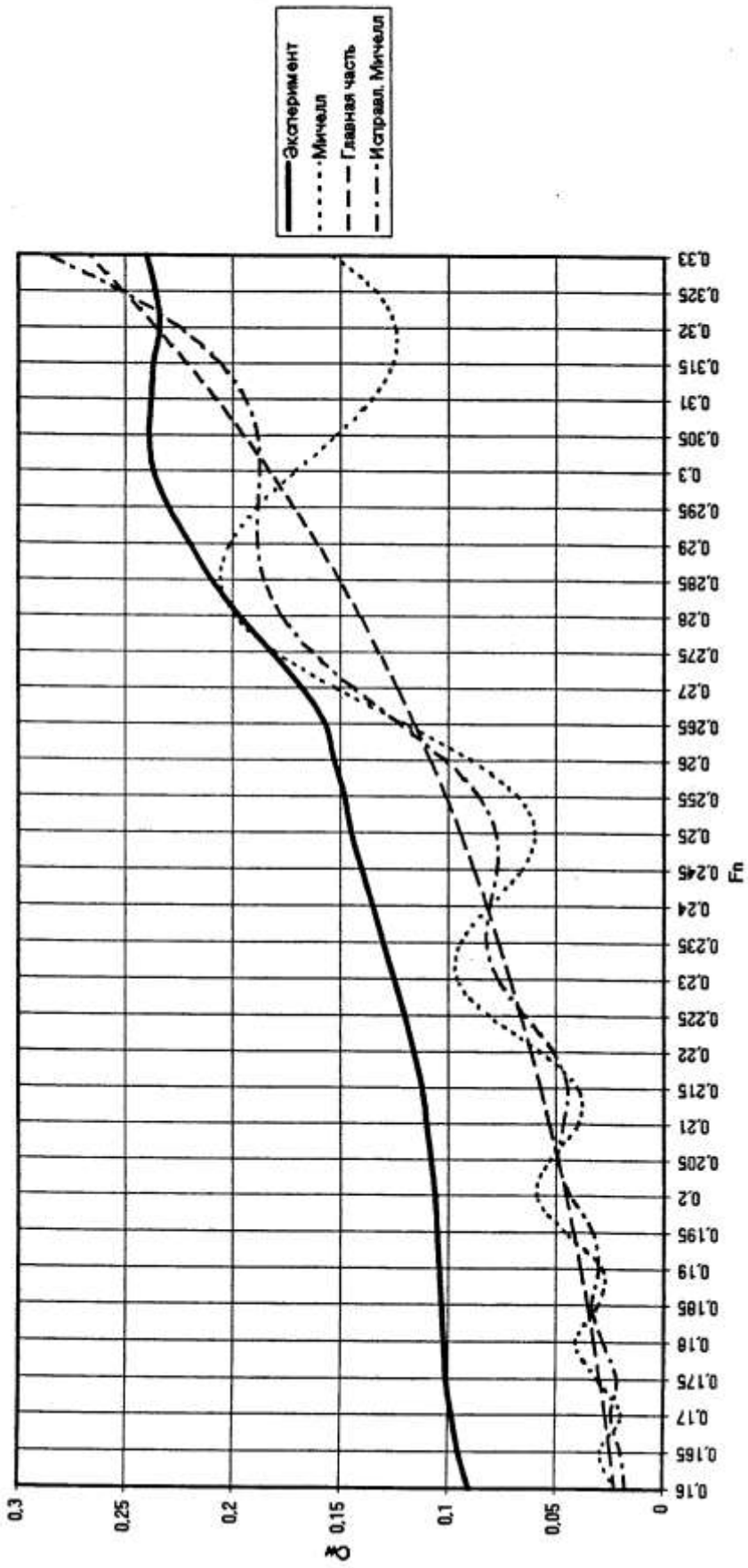


Рис. П4.4. Модель Виглея 1805А

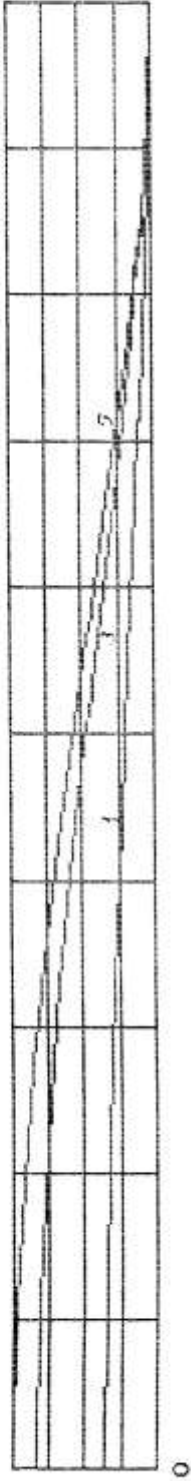
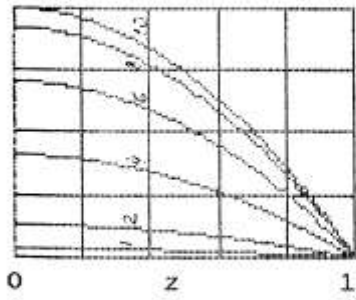


Рис. П4.5. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1805В

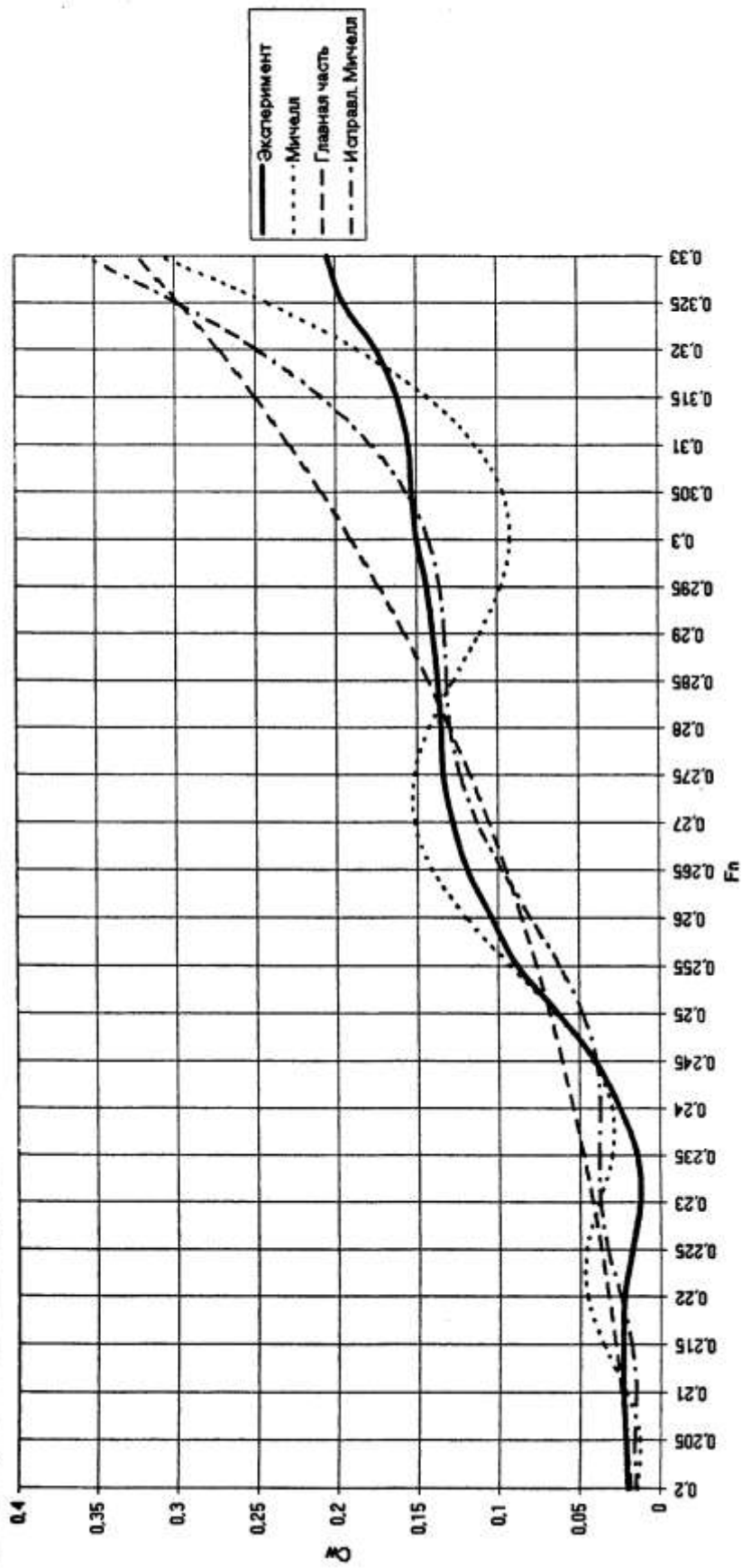


Рис. П4.6. Модель Виглея 1805В

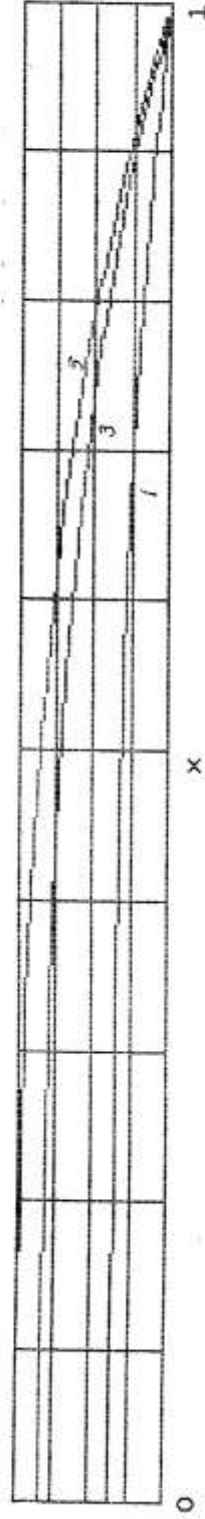
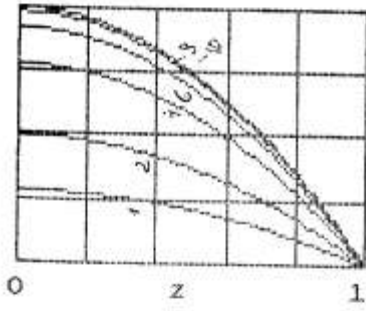


Рис. П4.7. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1846А

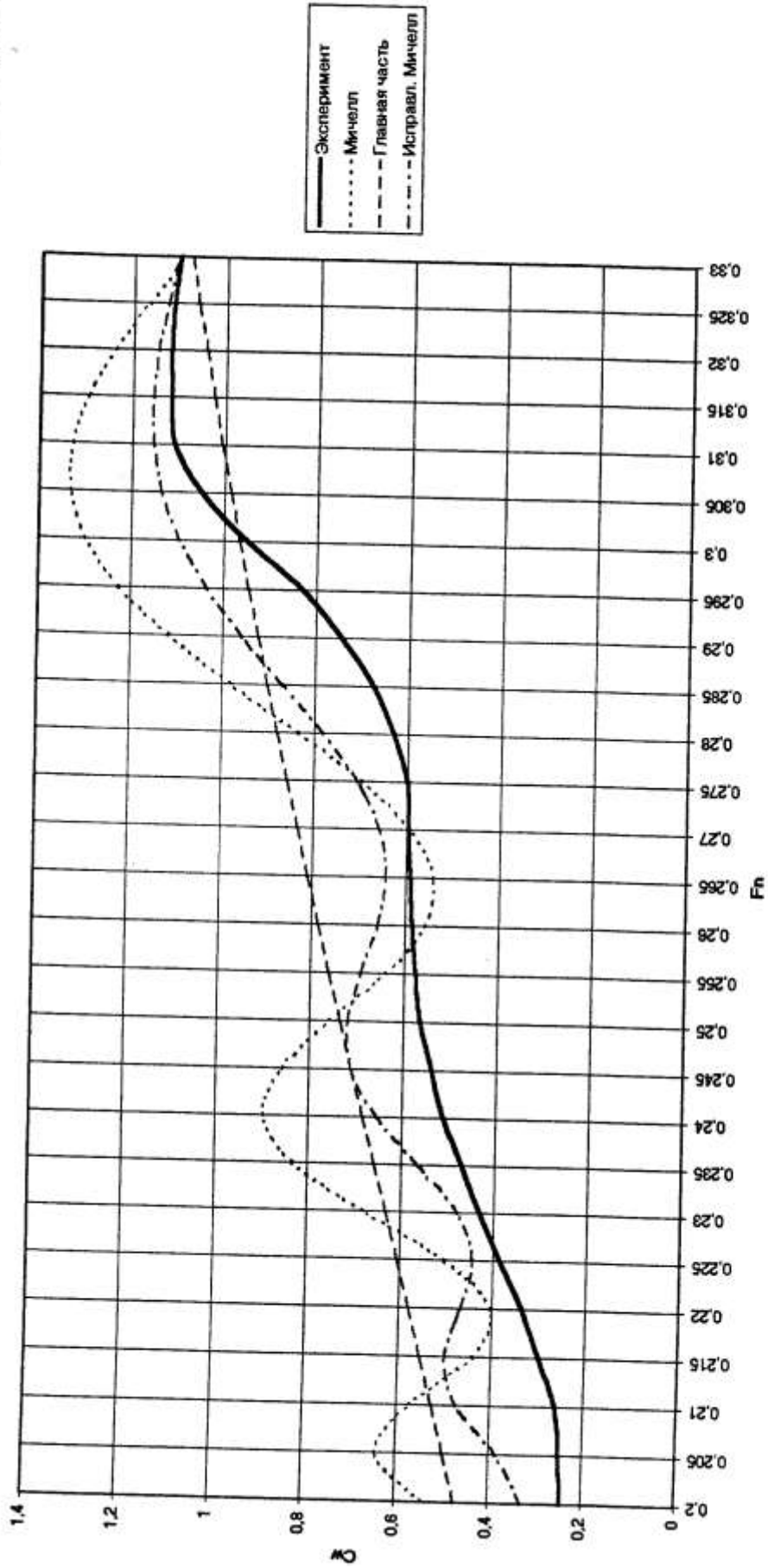


Рис. П4.8. Модель Виглея 1846А

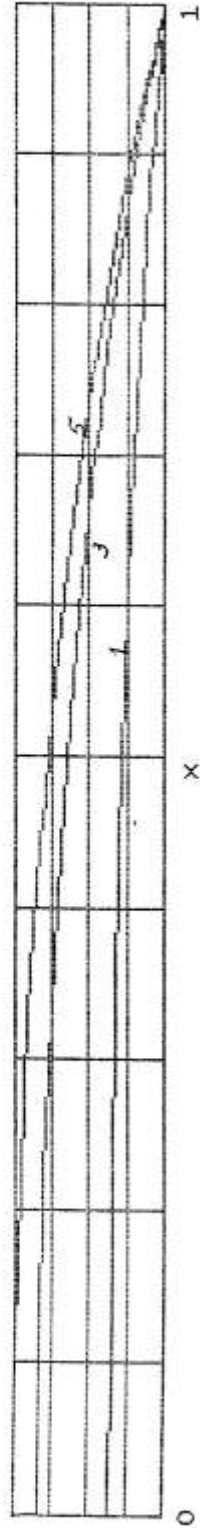
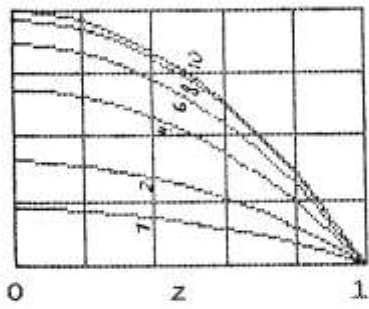


Рис. П4.9. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1846В

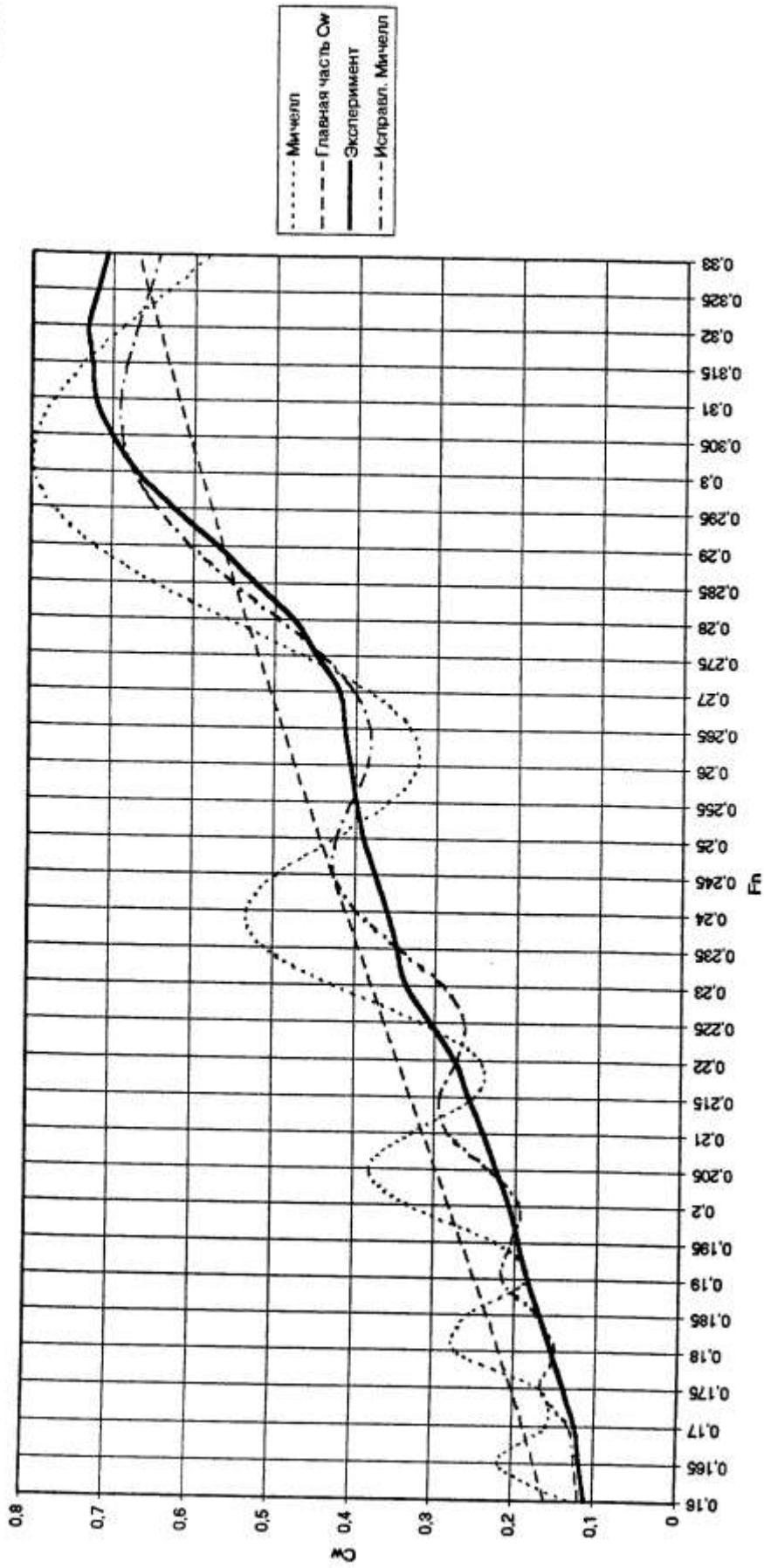


Рис. П4.10. Модель Виглея 1846В

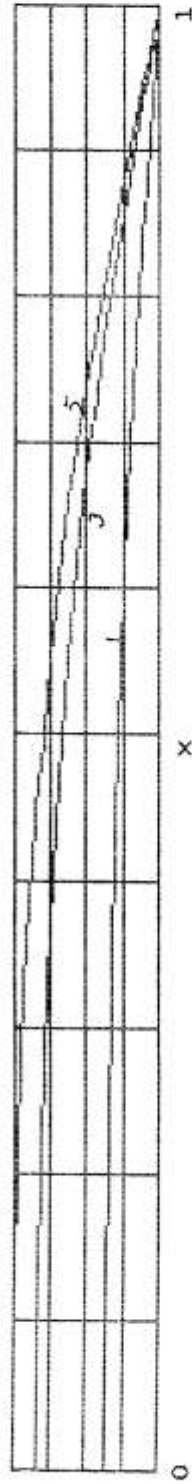
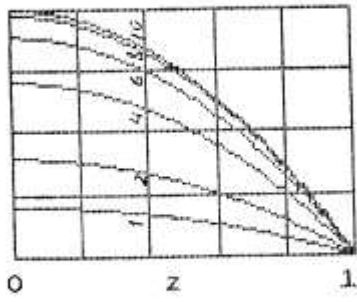


Рис. П4.11. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1970В

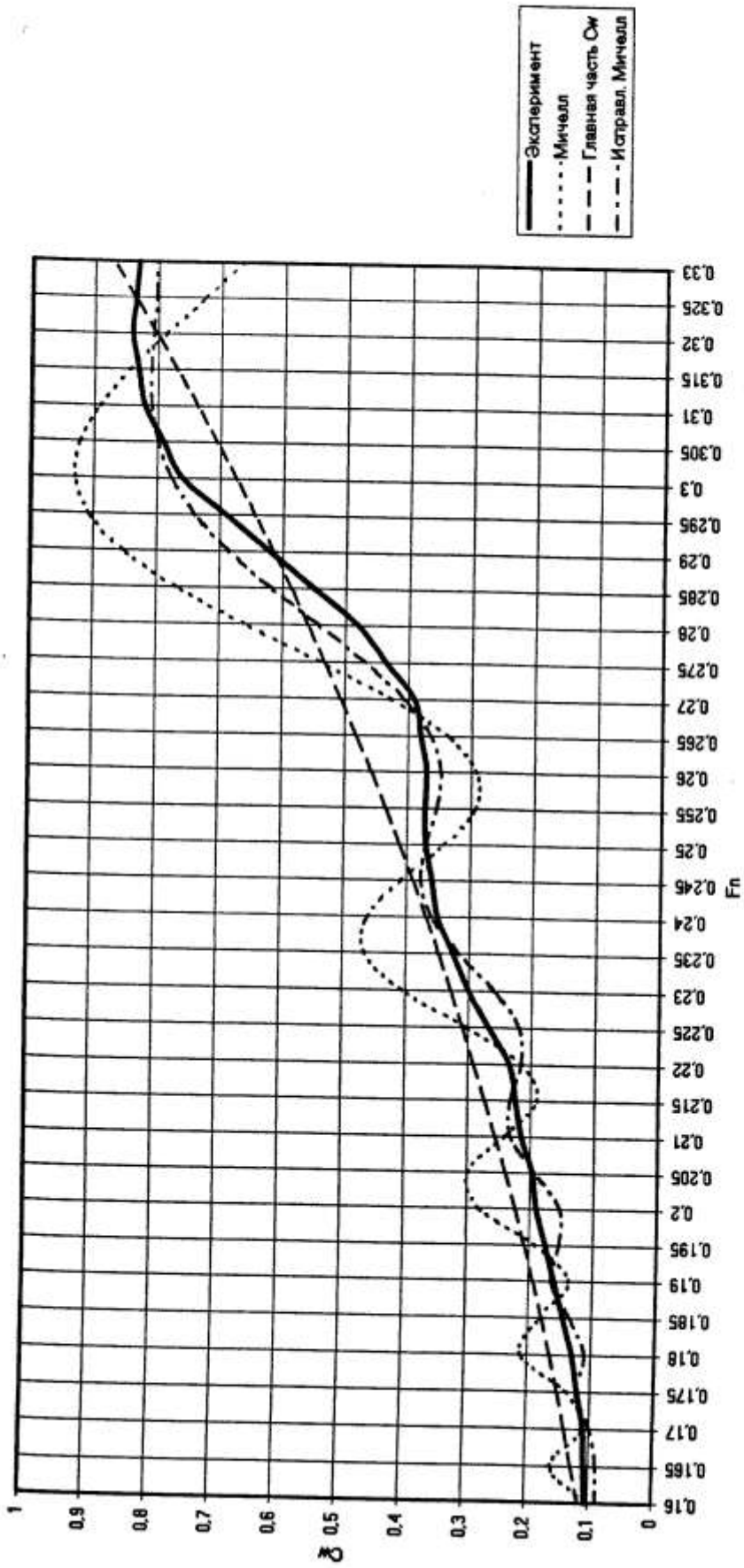


Рис. П4.12. Модель Виглея 1970В

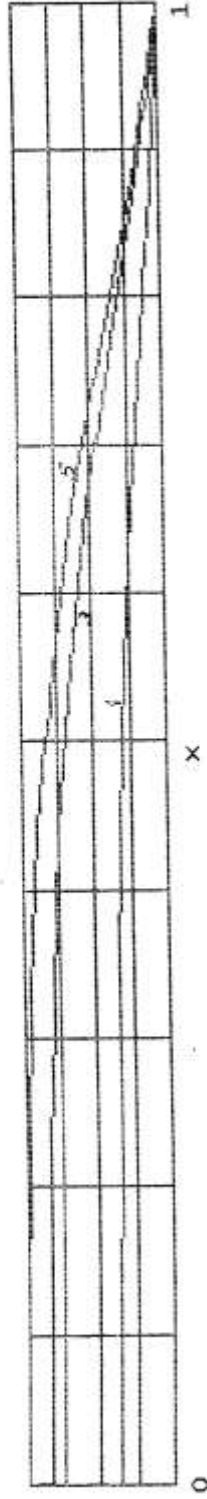
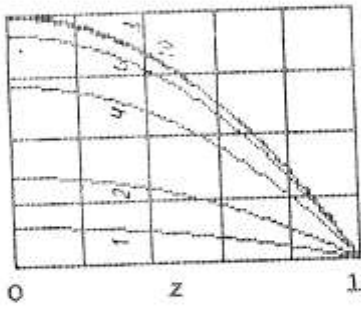


Рис. П4.13. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 1970С

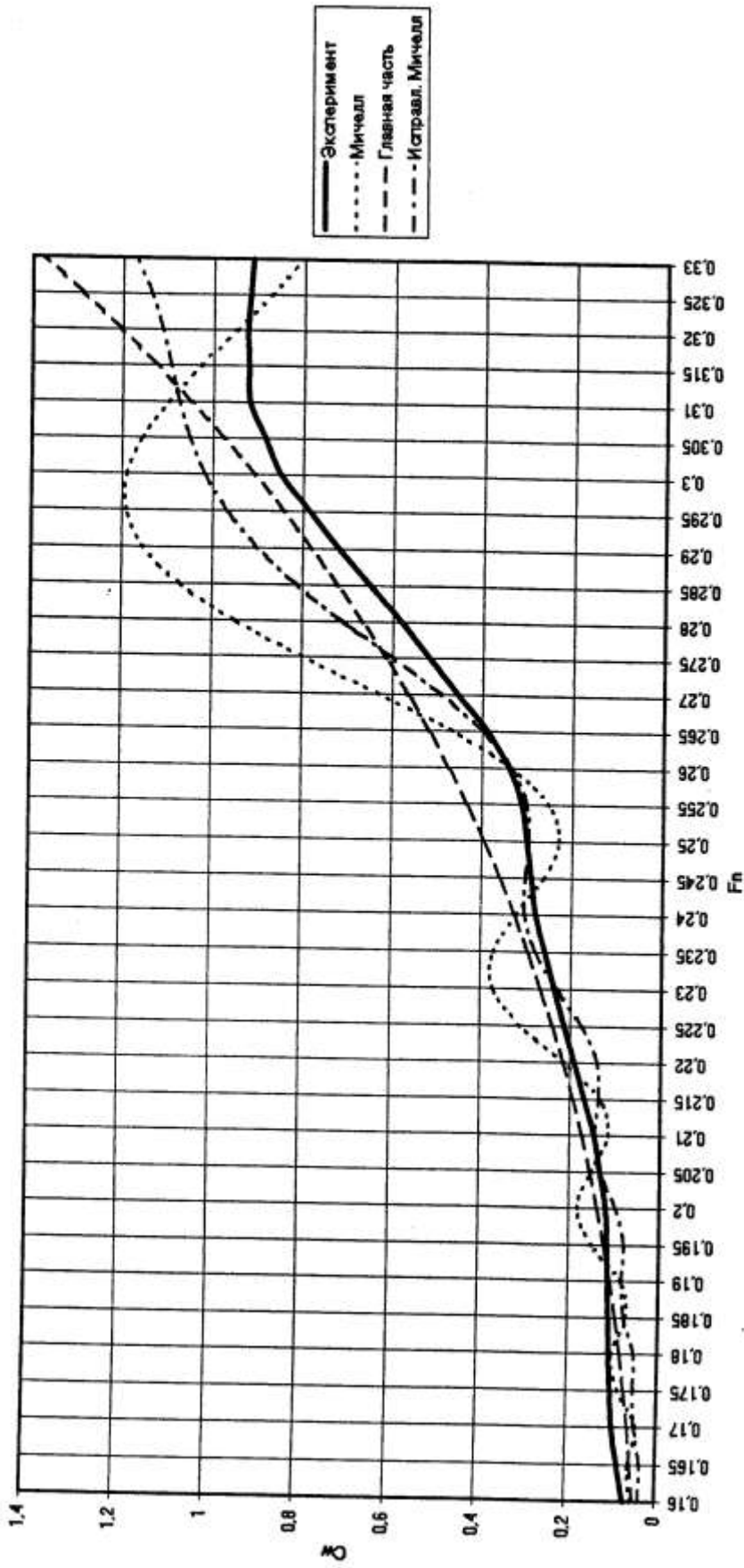


Рис. П4.14. Модель Виглея 1970С

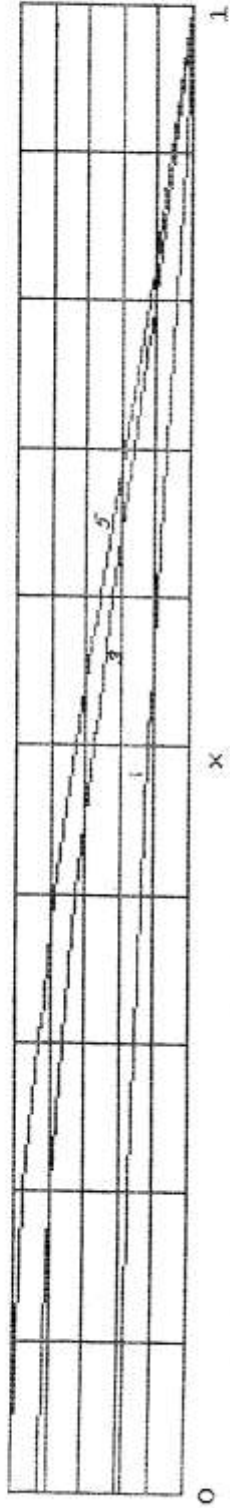


Рис. П4.15. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея 2038С

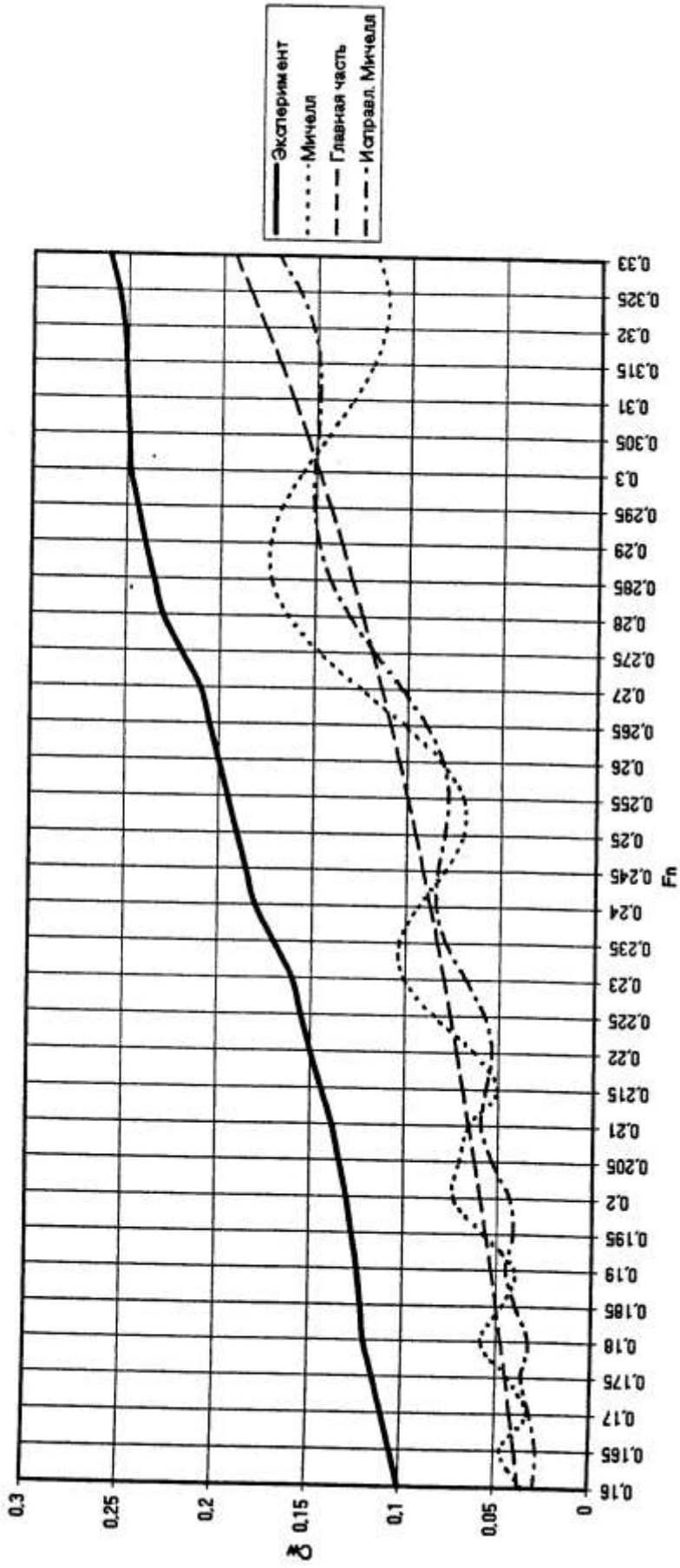


Рис. П4.16. Модель Виглея 2038С

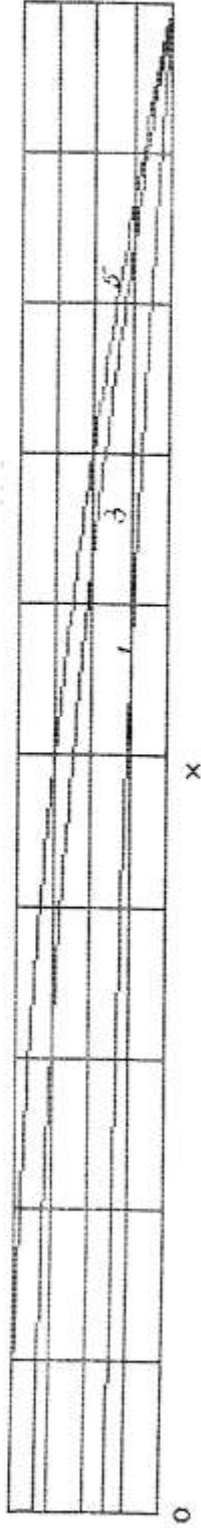
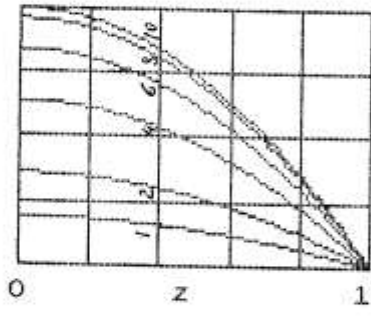


Рис. П4.17. Шпангоуты и ватерлинии параболической модели Виглея

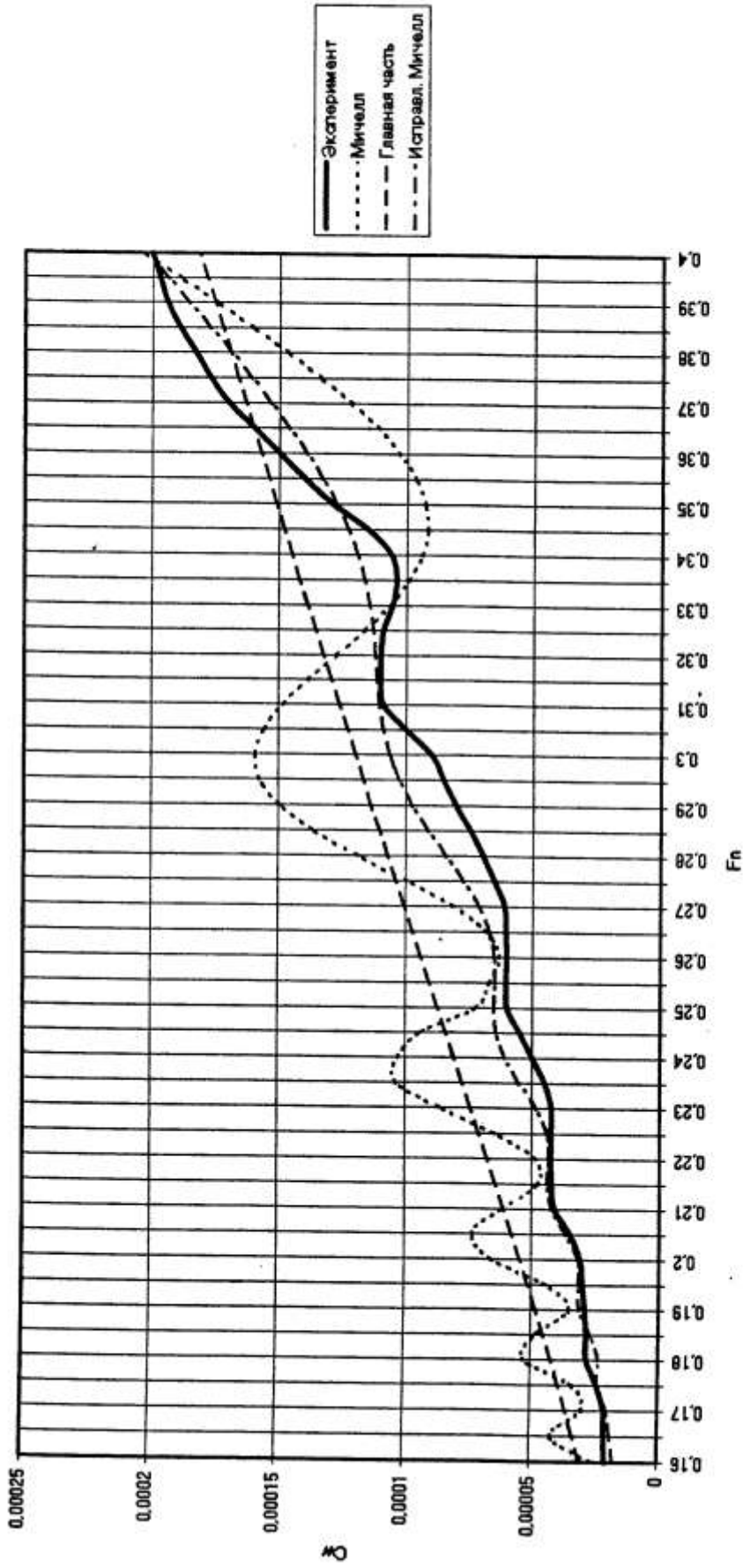


Рис. П4. 18. Параболическая модель Виглея

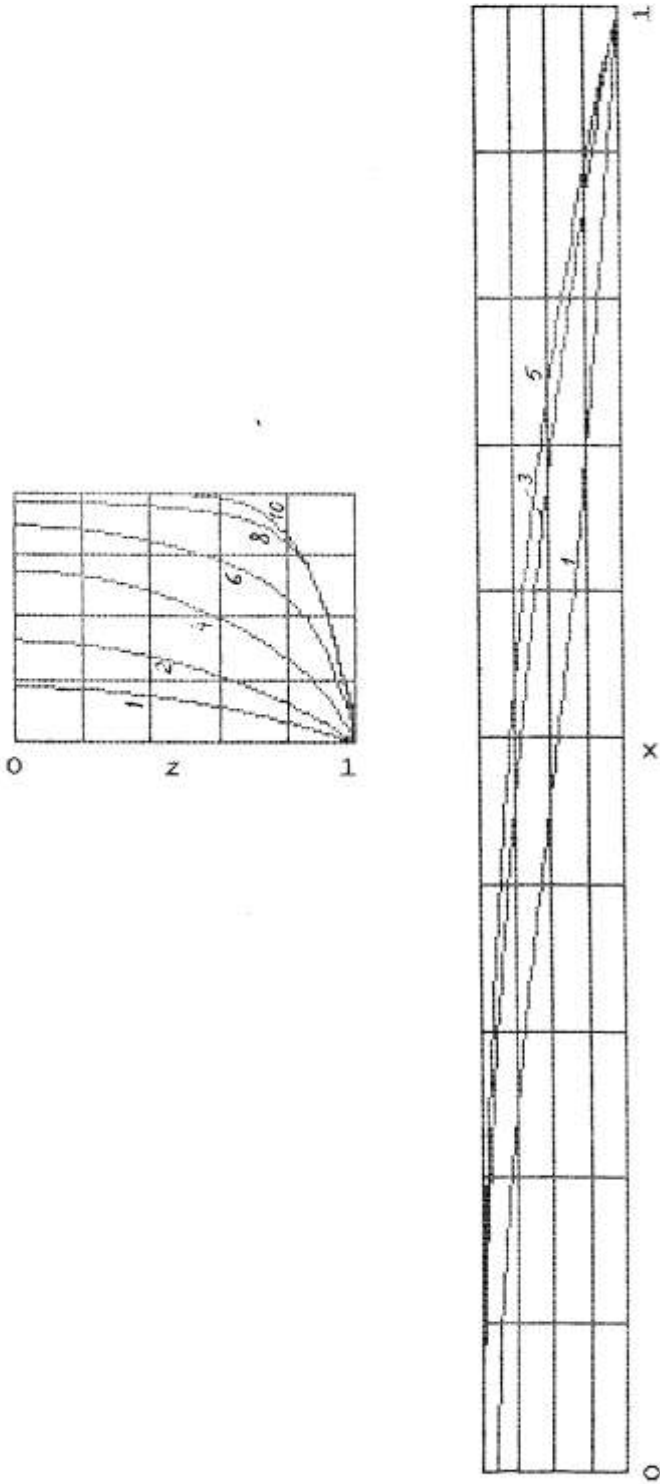


Рис. П4.19. Шпангоуты и ватерлинии модели Виглея N43

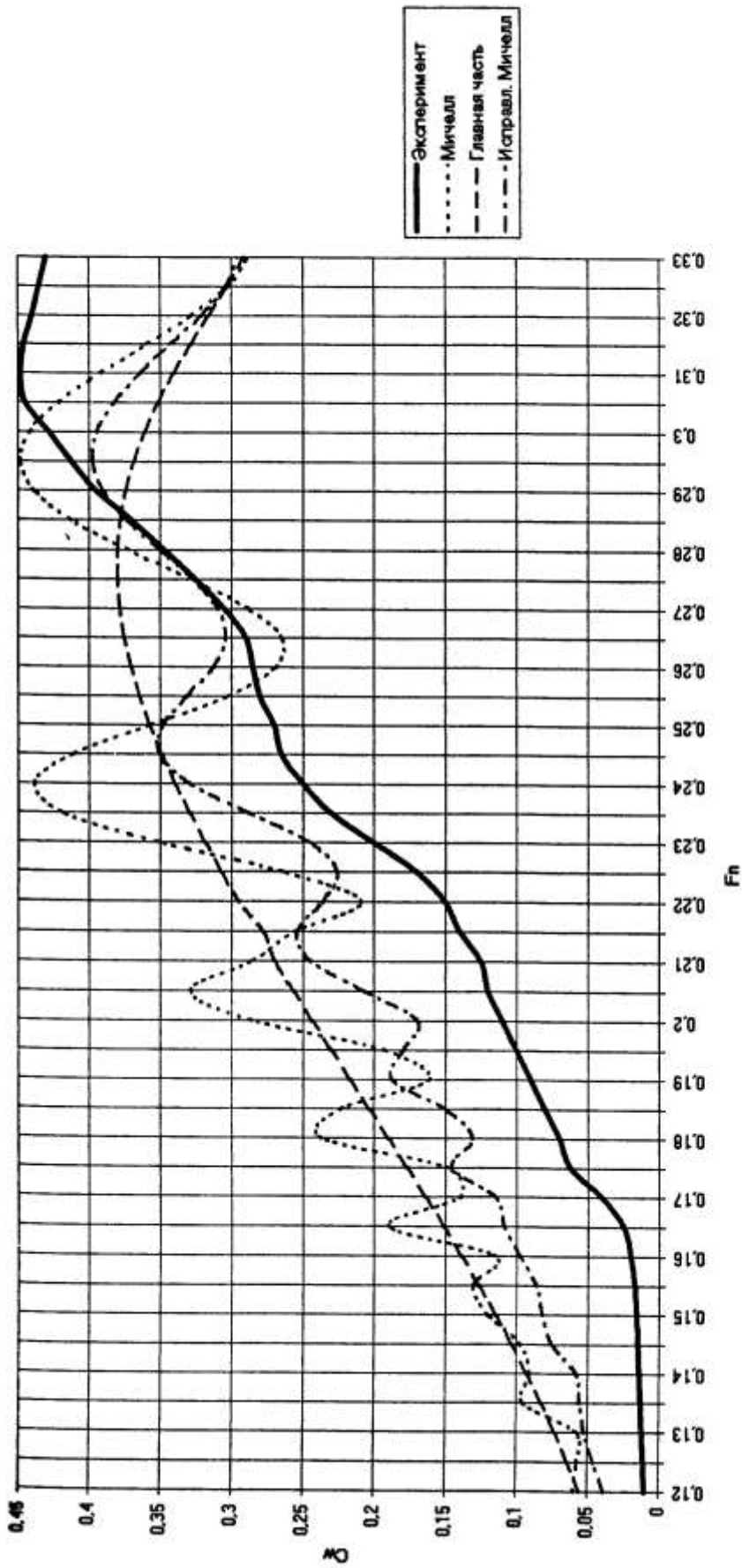


Рис. П4.20. Модель Виглея N43

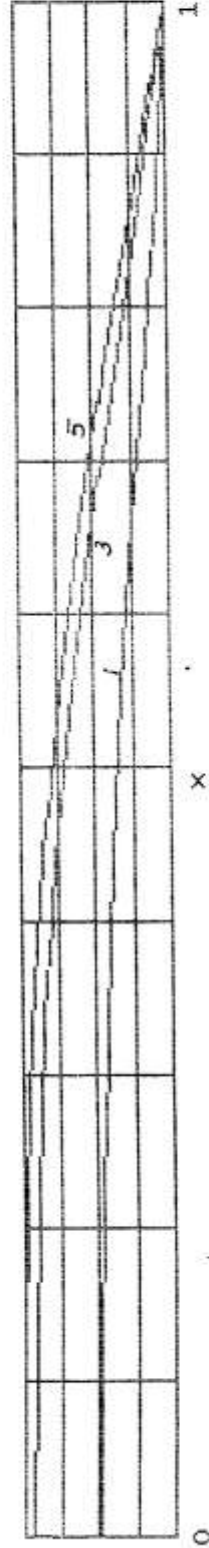
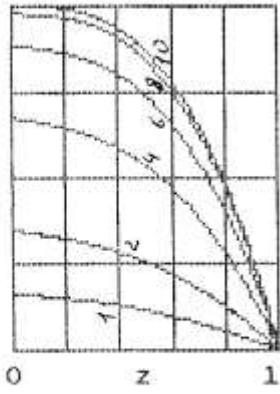


Рис. П4.21. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1098

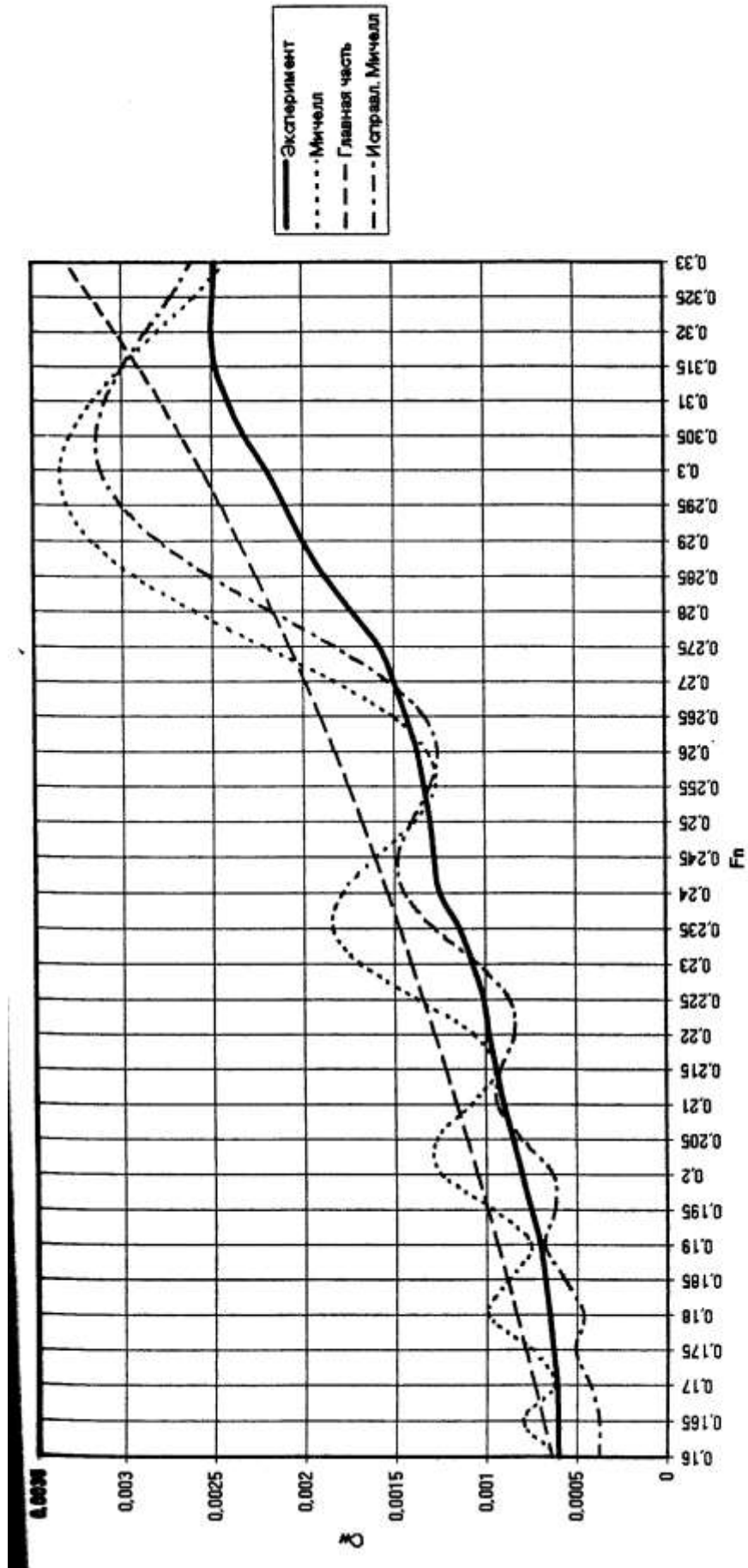


Рис. П4.22. Модель Вейнблума 1098

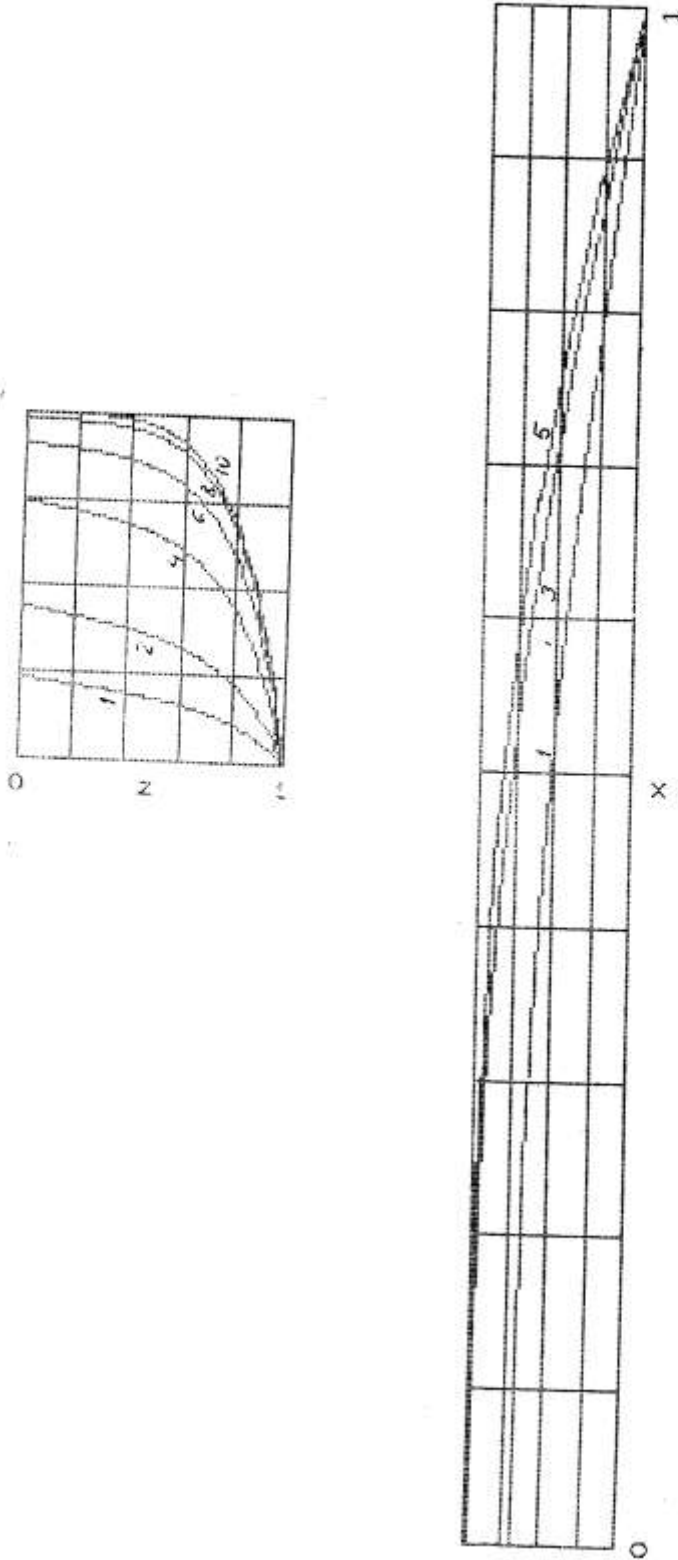


Рис. П4.23. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1100

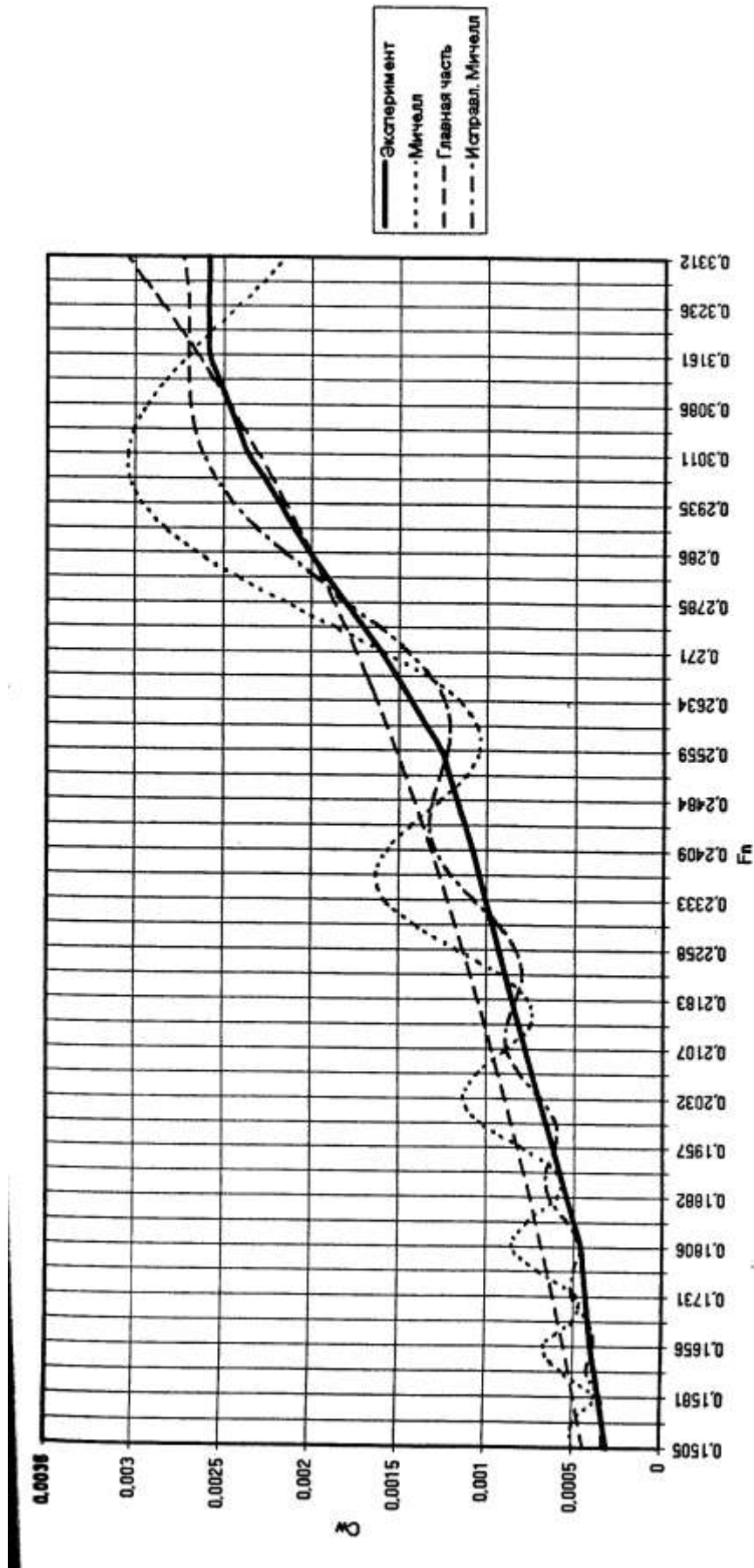


Рис. П4.24. Модель Вейнблума 1100

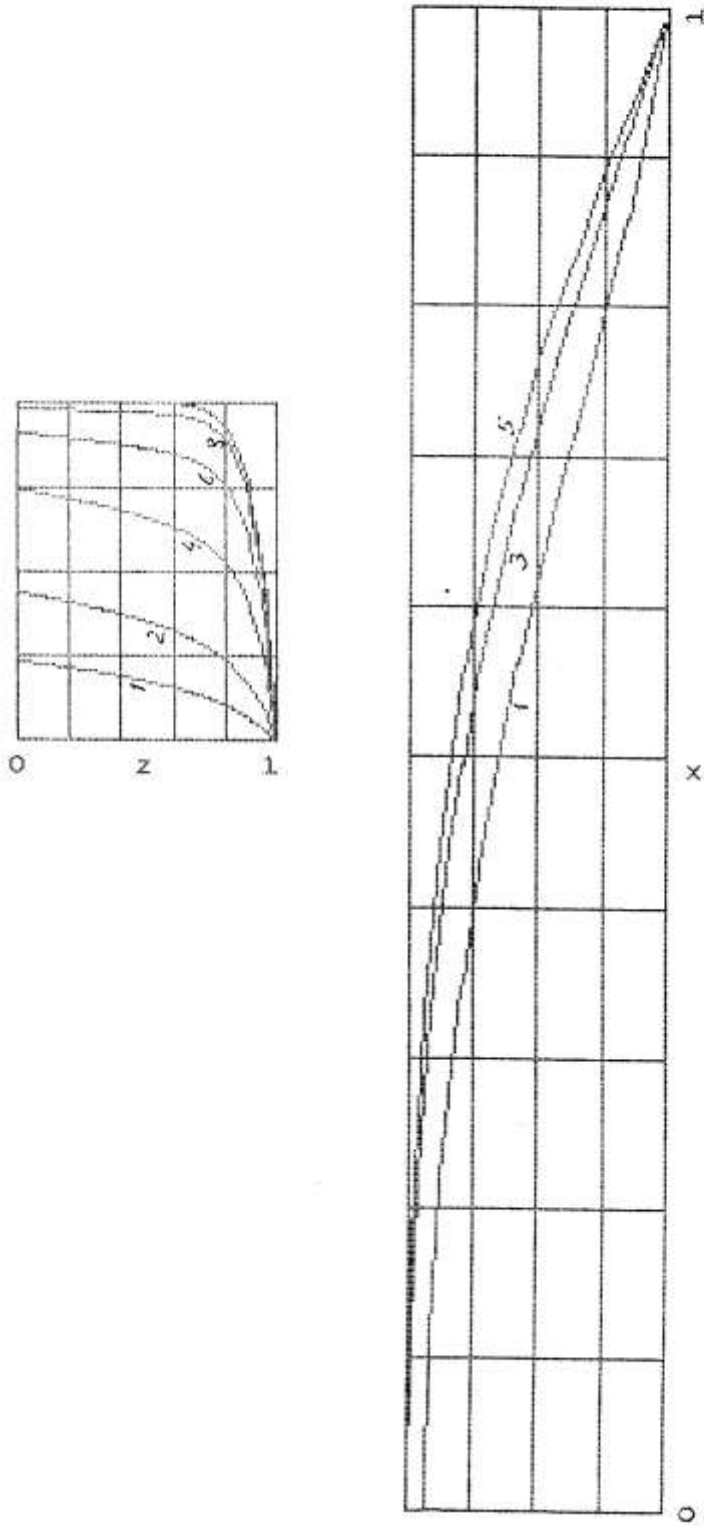


Рис. П4.25. Шпангоуты и ватерлинии модели Вейнблума 1102

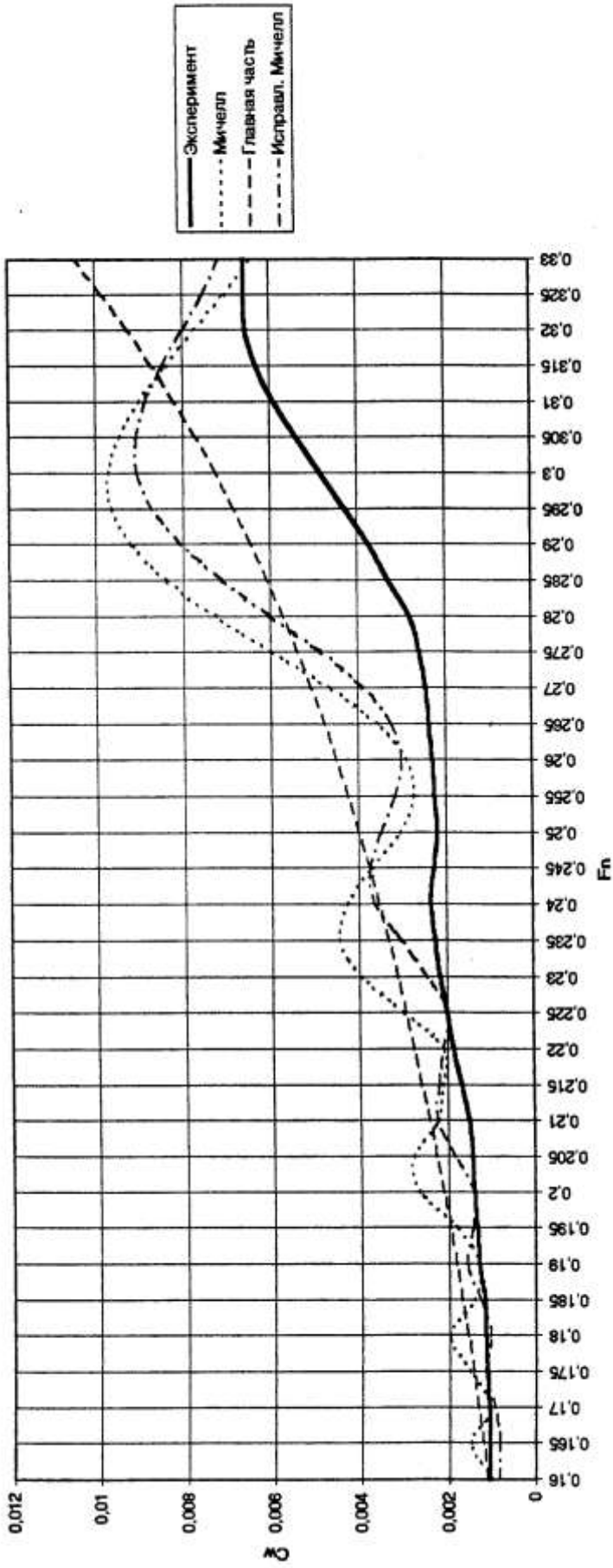


Рис. П4.26. Модель Вейнблума 1102 (широкая)

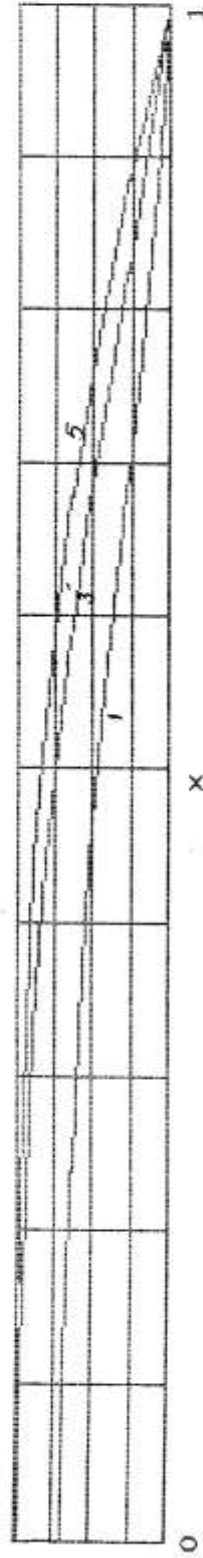
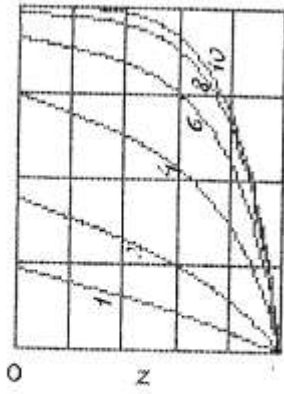


Рис. П4.27. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1110

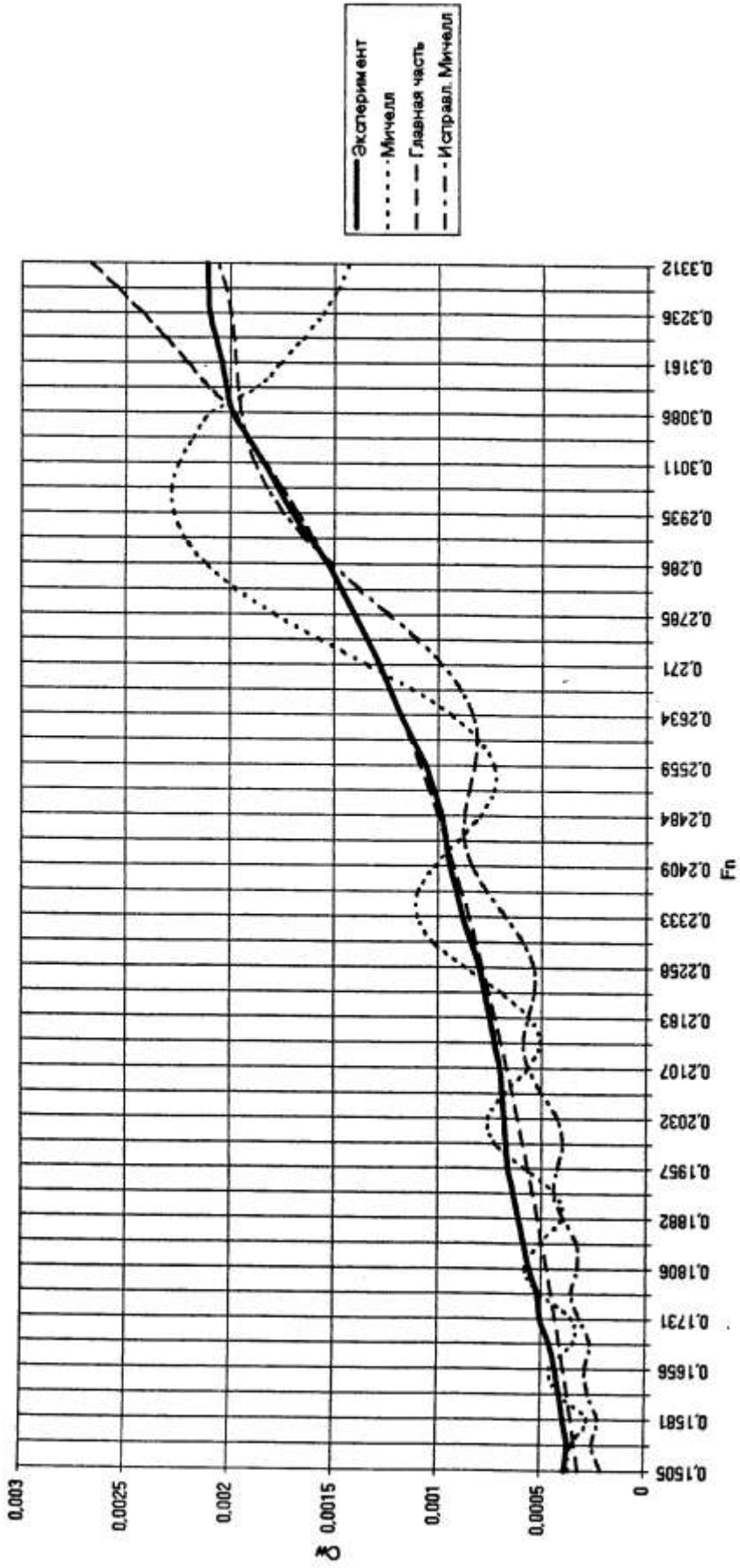


Рис. П4.28. Модель Вейнблума 1110

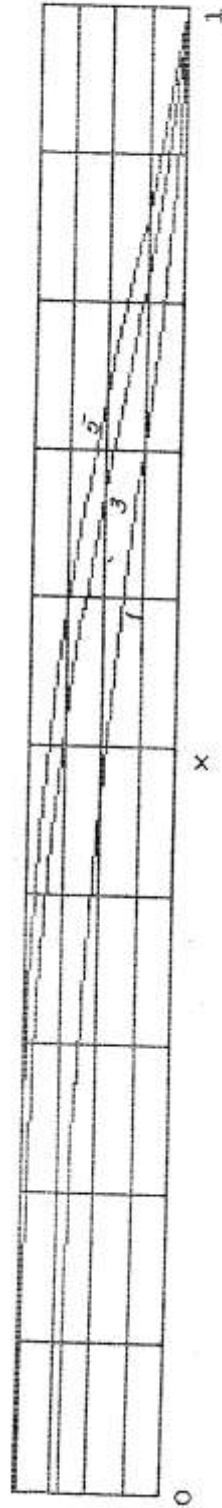
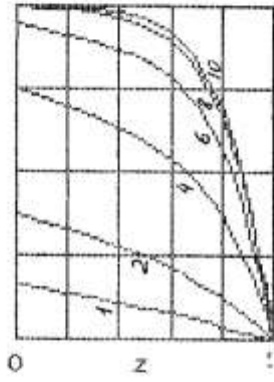


Рис. П4.29. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1111

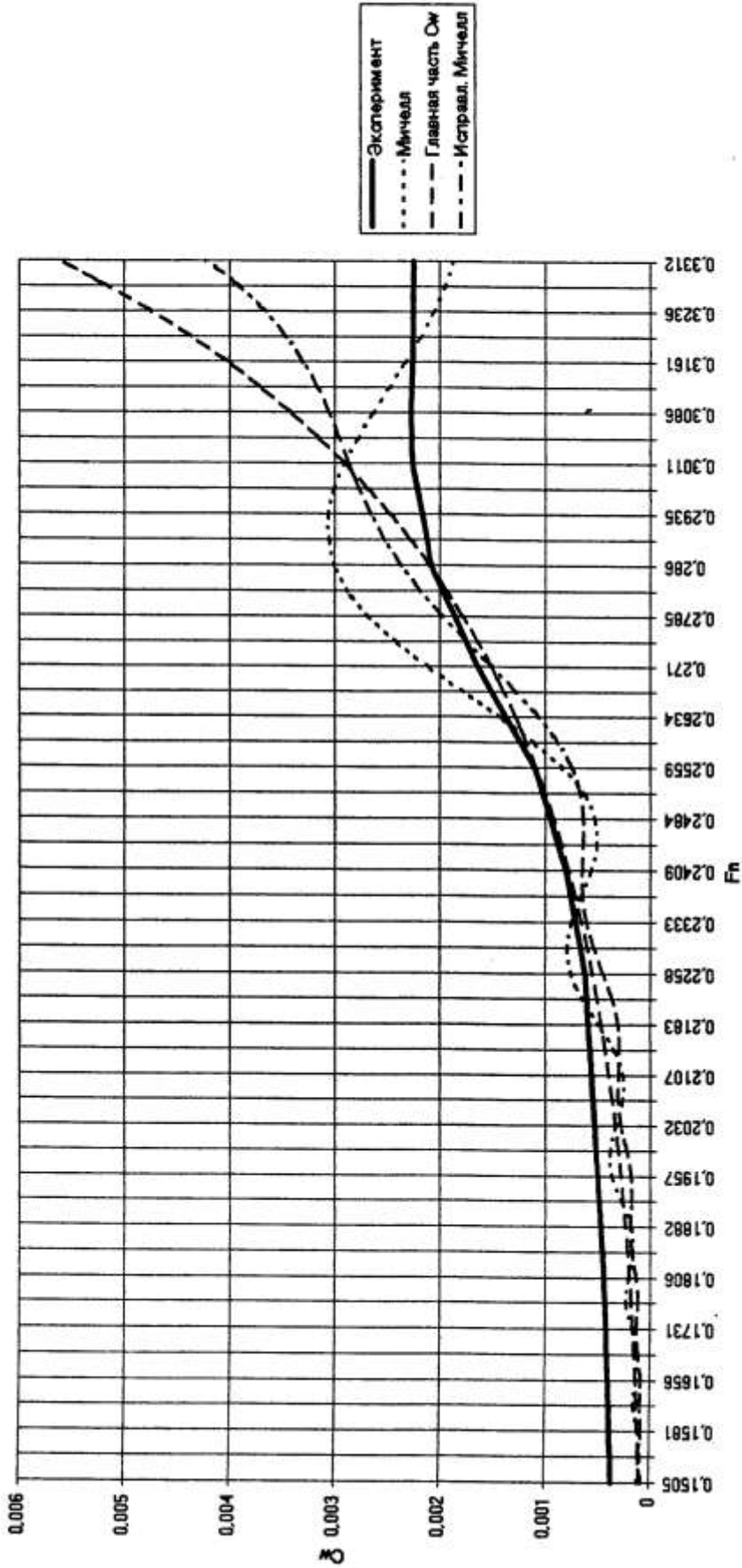


Рис. П4.30. Модель Вейнблума 1111

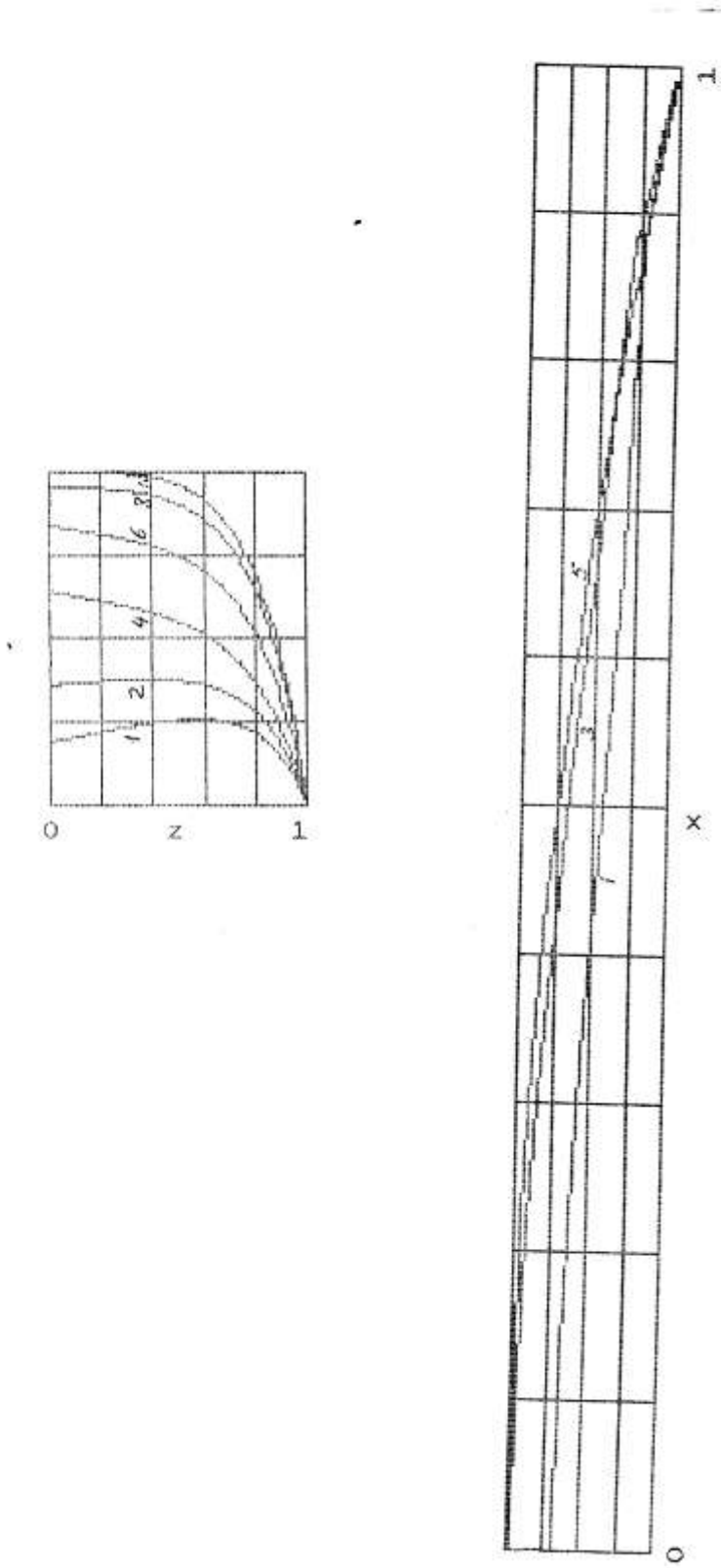


Рис. П4.31. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1112

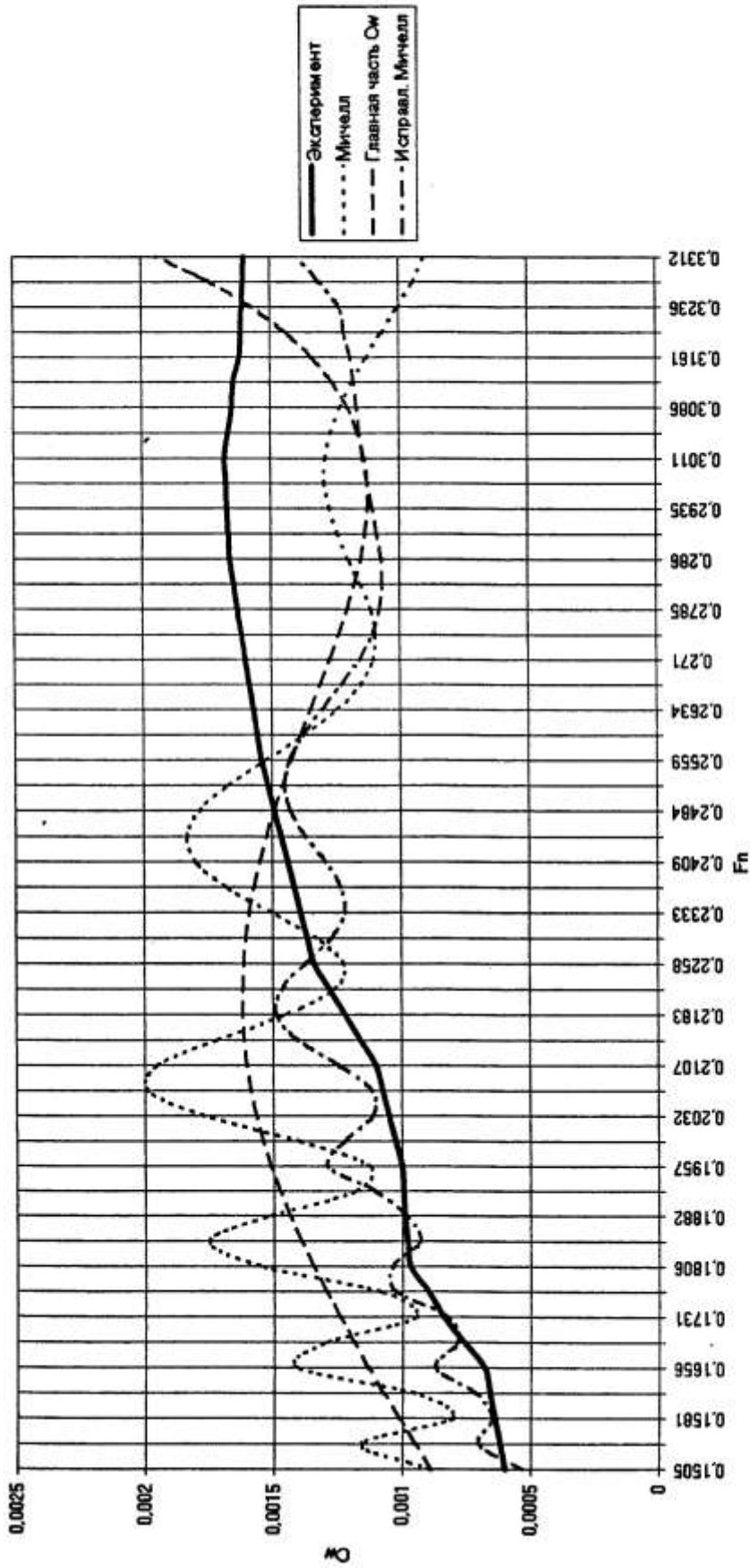


Рис. П4.32. Модель Вейнлюма 1112

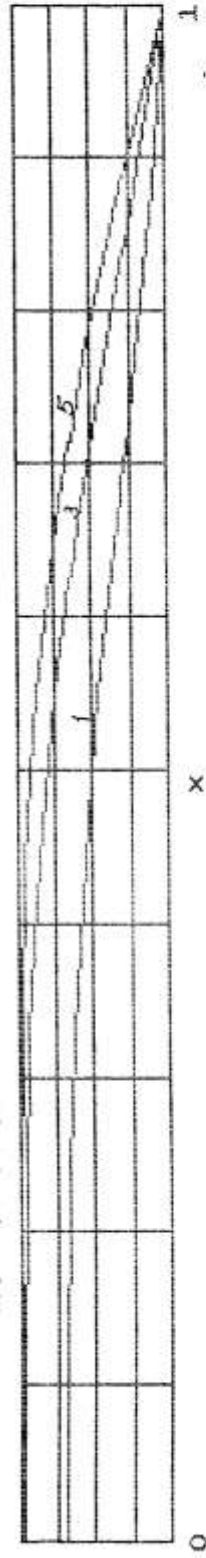
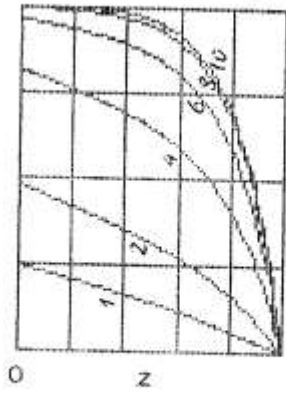


Рис. П4.33. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1113

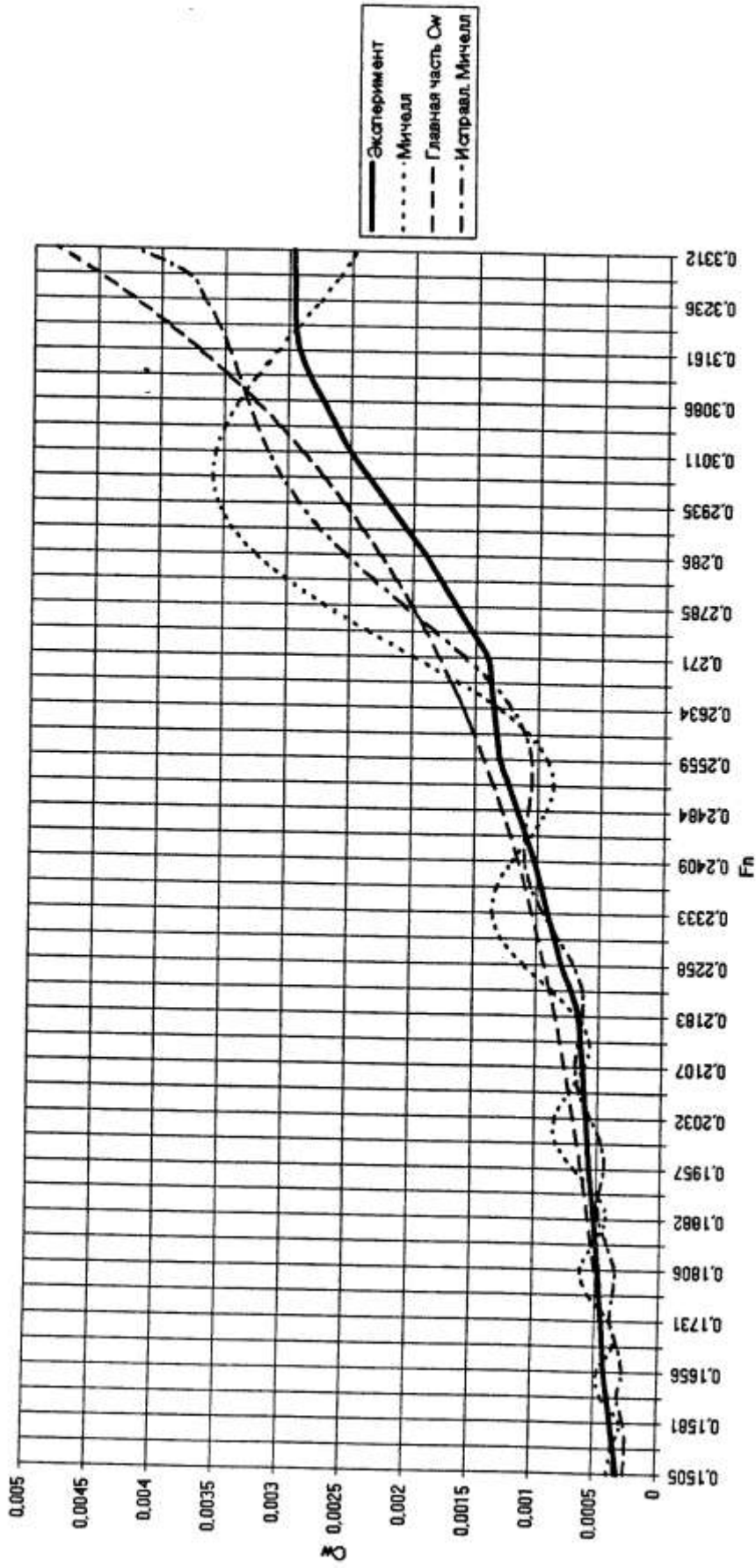


Рис. П4.34. Модель Вейнблума 1113

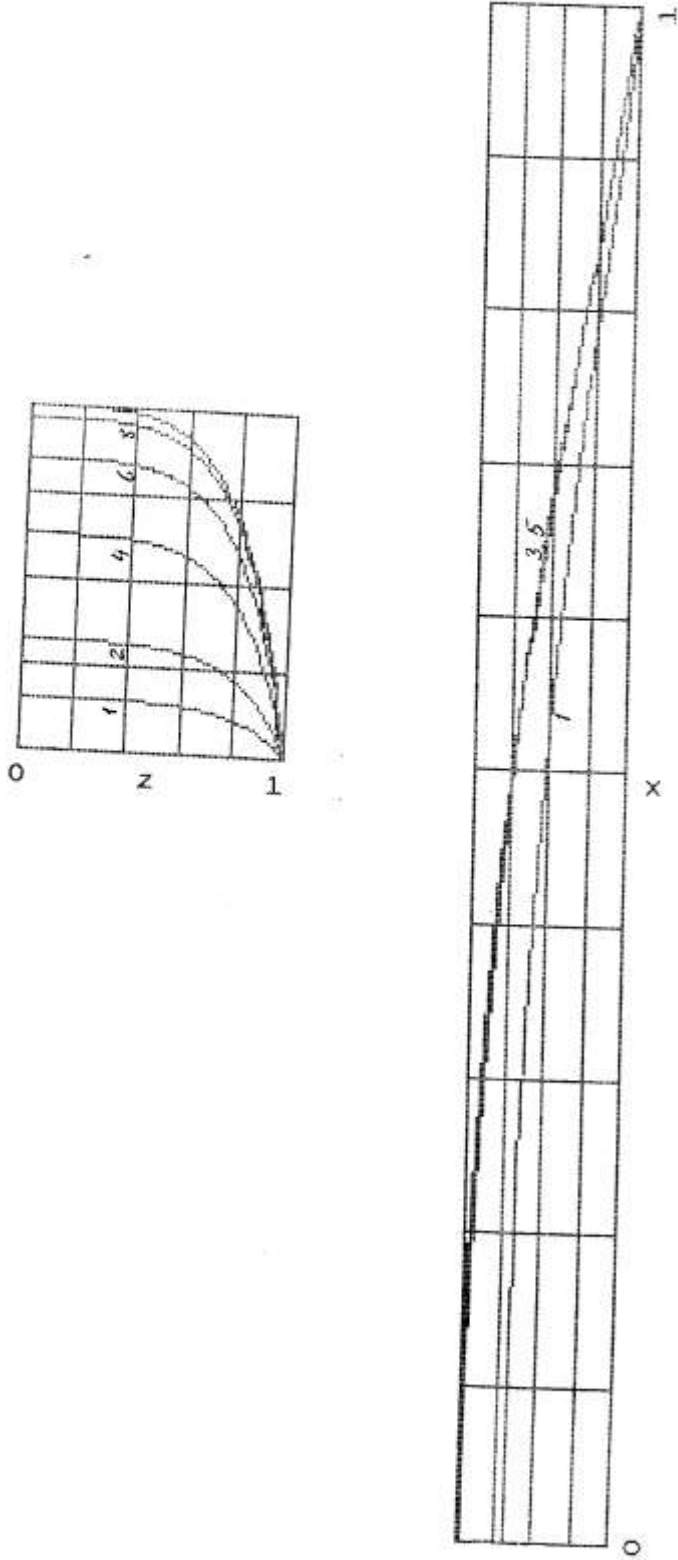


Рис. П4.35. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1114

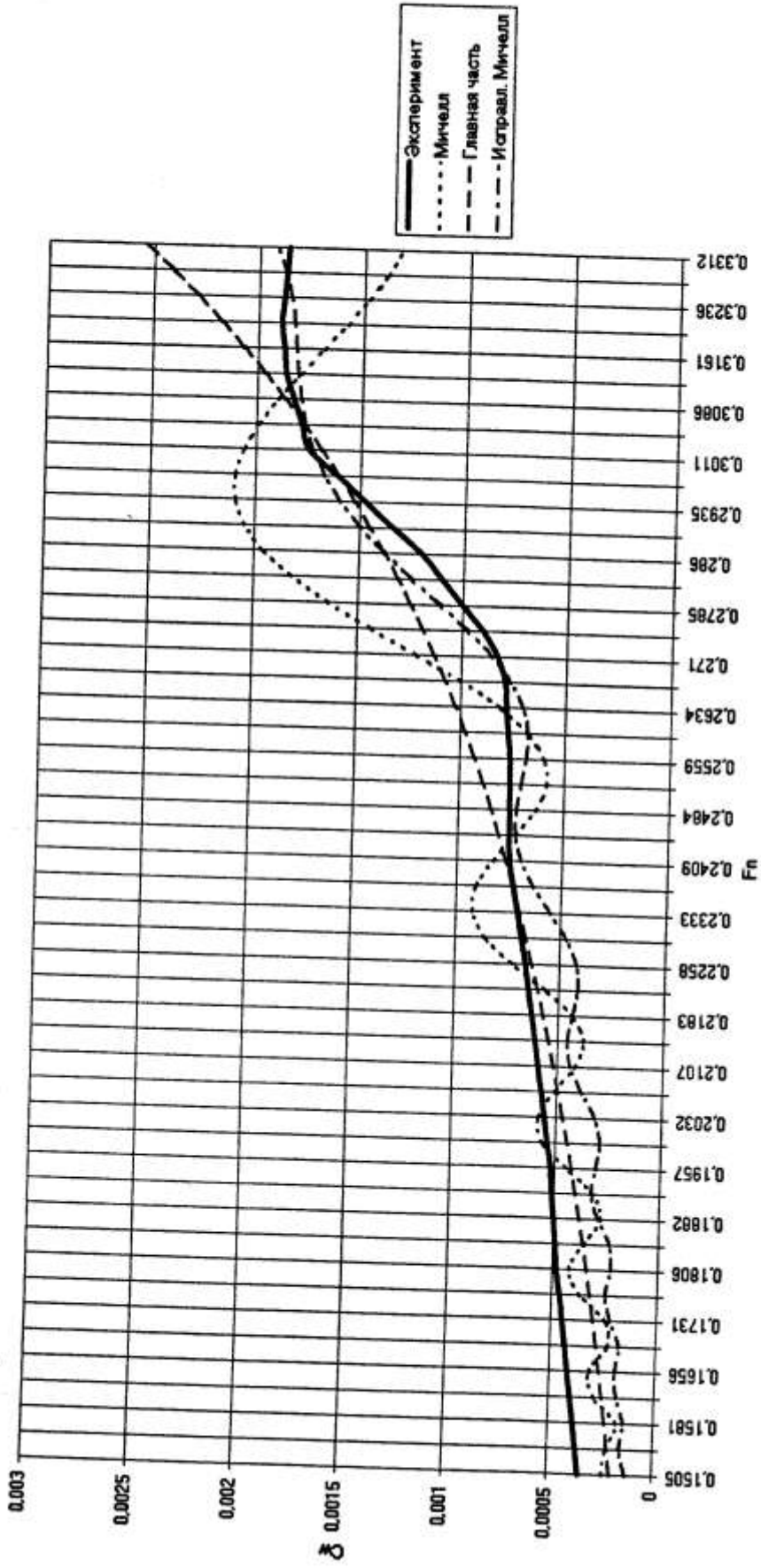


Рис. П4.36. Модель Вейнблума 1114

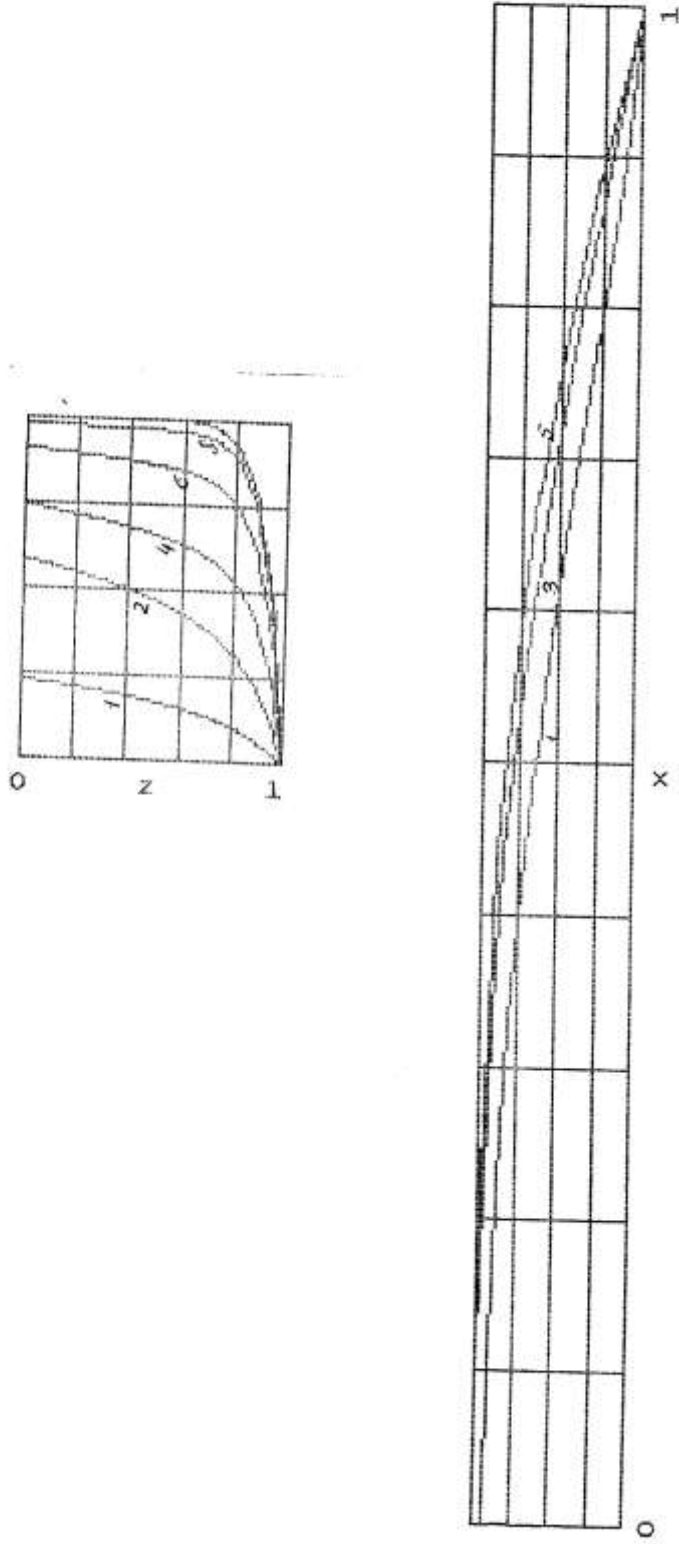


Рис. П4.37. Шпангоуты и ватерлинии модели
Вейнблума 1136

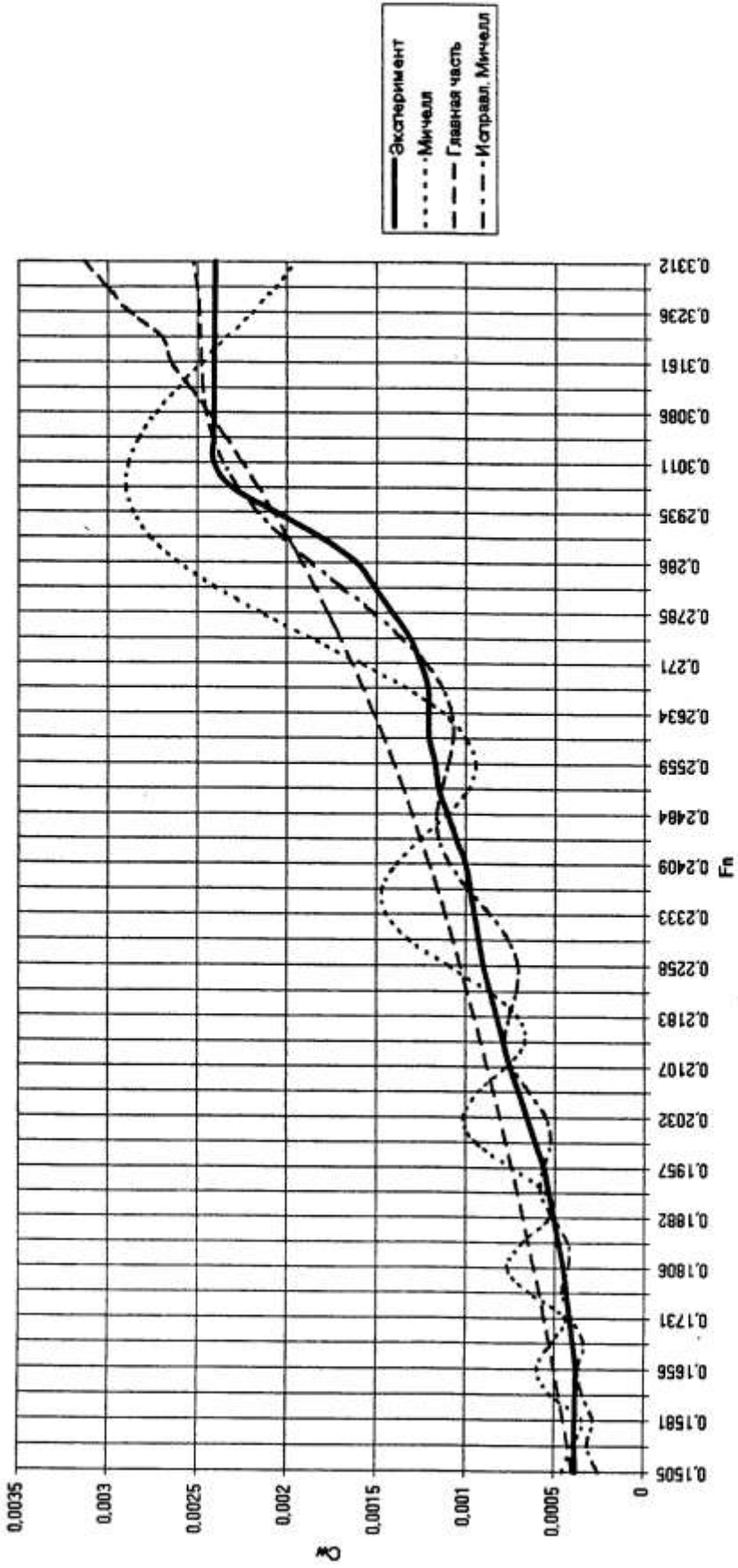


Рис. П4.38. Модель Вейнблума 1136

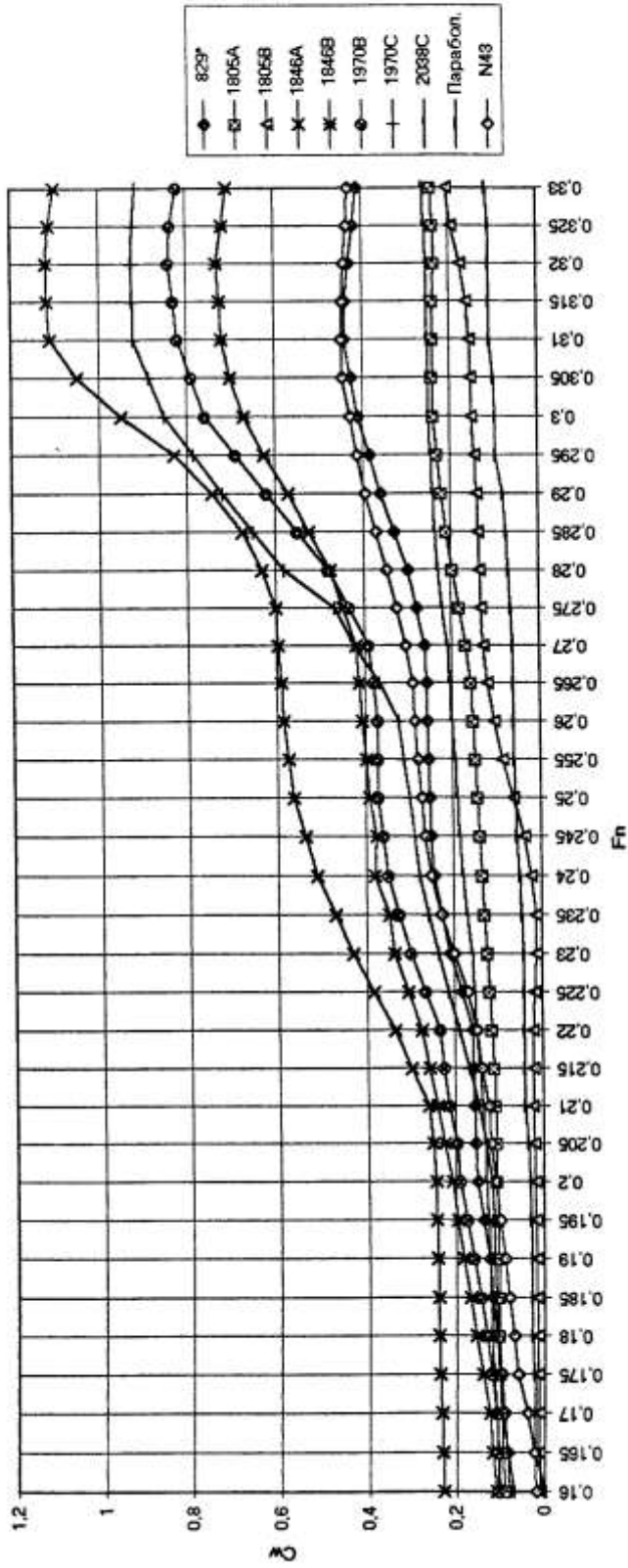


Рис. П4.39. Экспериментальные коэффициенты волнового сопротивления моделей Виглея

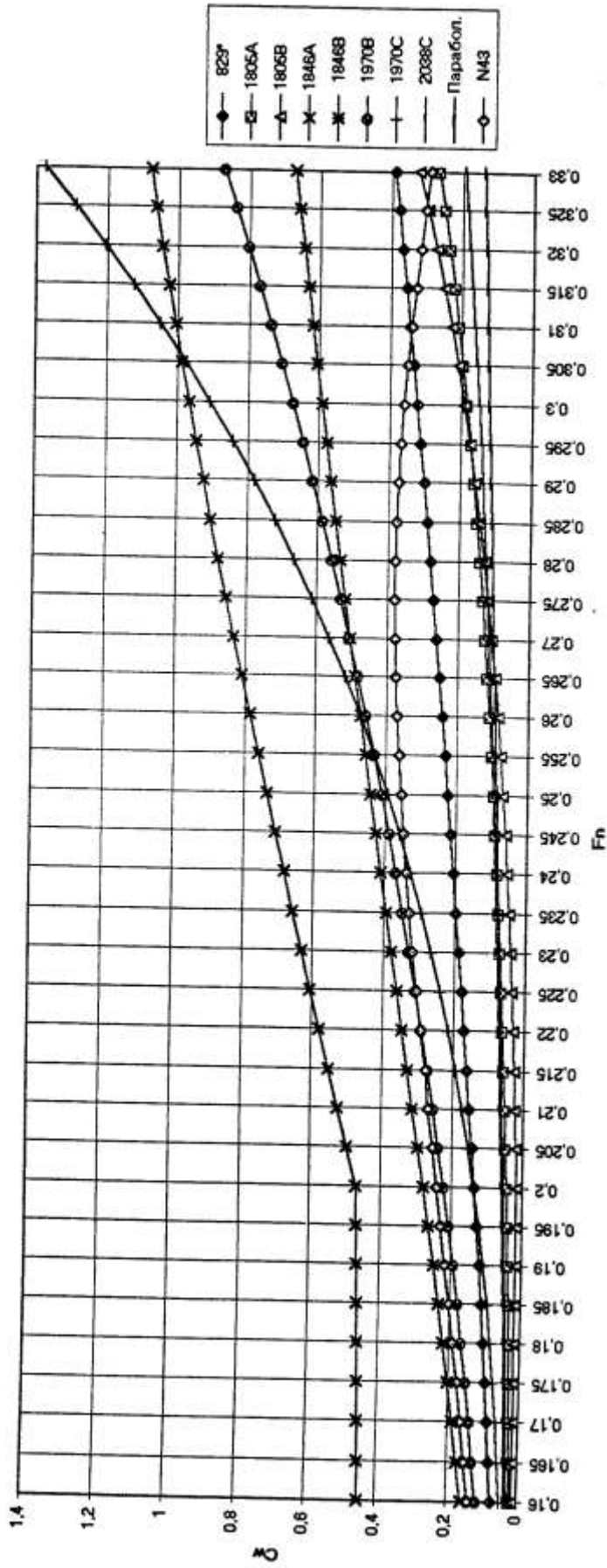


Рис. П4.40. Главные значения коэффициентов волнового сопротивления моделей Виглея

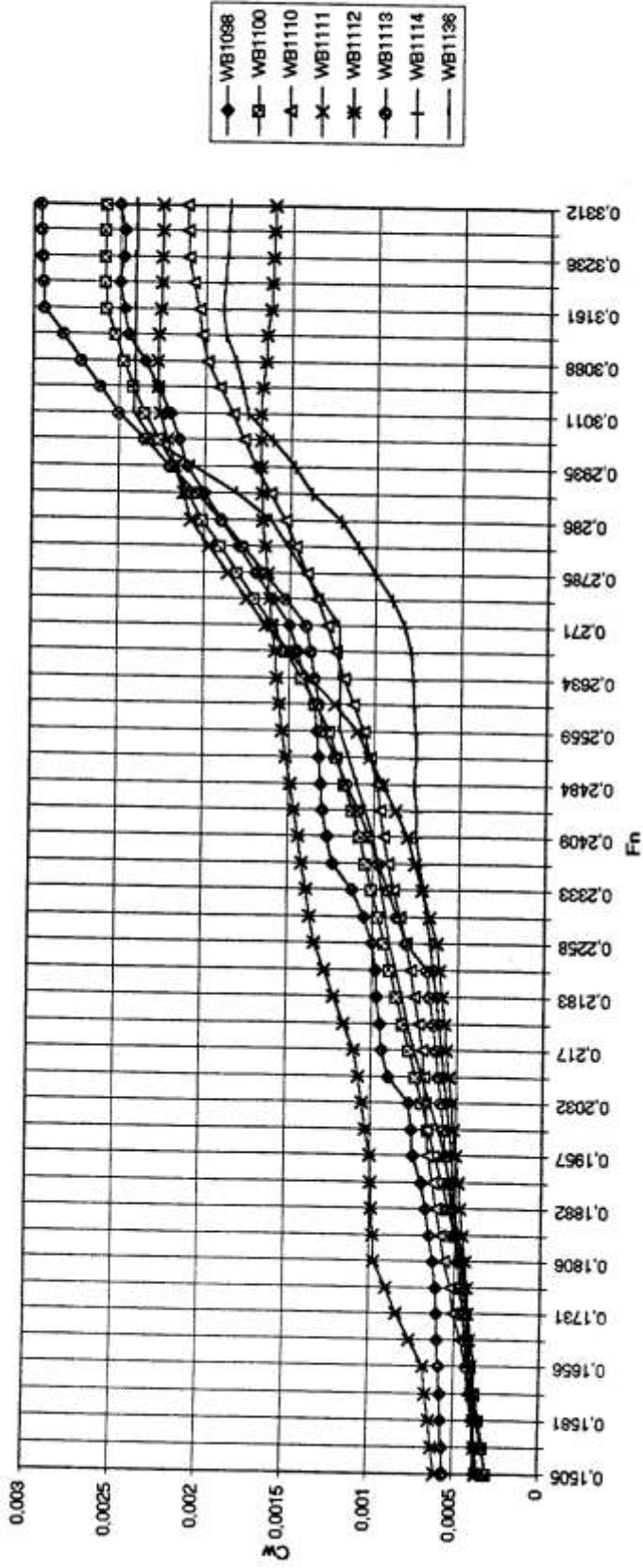


Рис. П4.41. Экспериментальные коэффициенты волнового сопротивления моделей Вейнблума

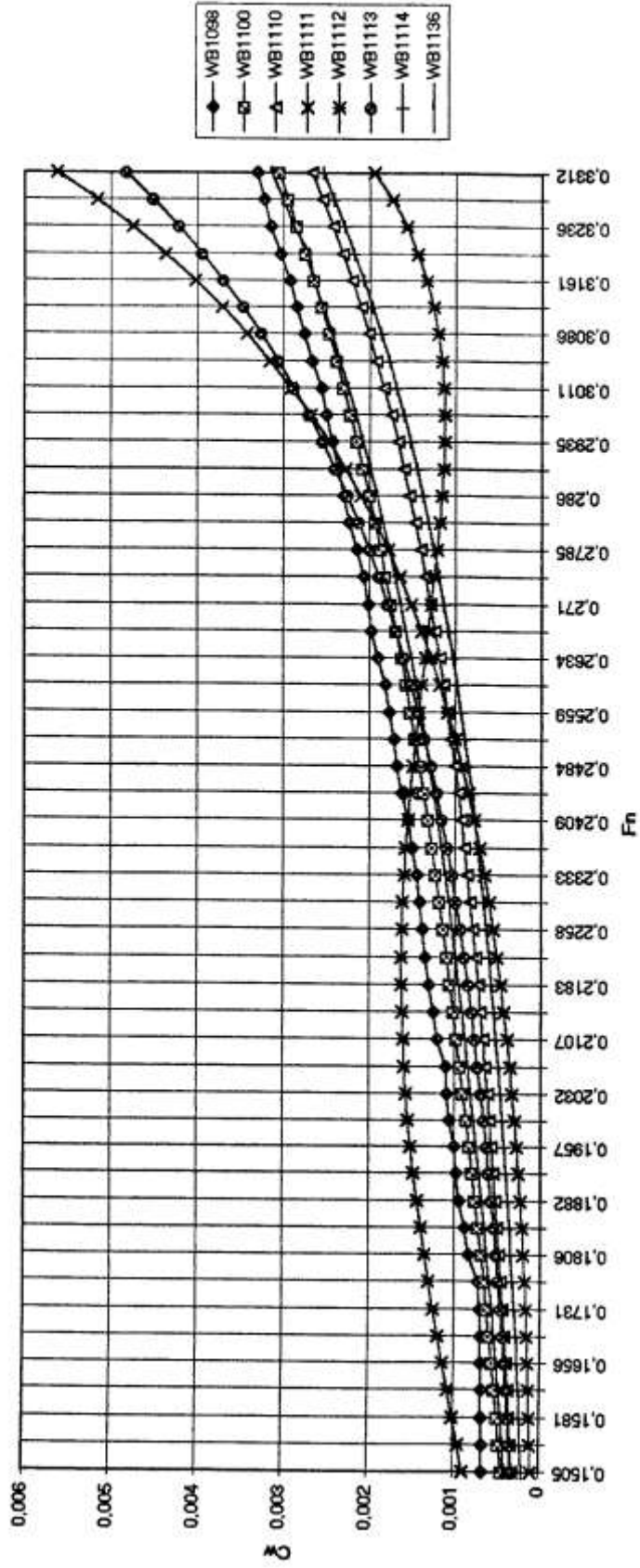


Рис. П4.42. Главная часть коэффициентов волнового сопротивления моделей Вейблума