

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ДНИЩЕ ПЛАВАЮЩЕЙ МАШИНЫ

**Бугаев С. В.** (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса*)

Приведены некоторые результаты испытаний модели плавающей машины в аэродинамической трубе, позволившие установить закономерности распределения давления потока воздуха по поверхности подводной части корпуса машины. Предложена методика определения гидродинамических сил, действующих на днище плавающей машины. Результаты расчетов подтверждаются опытными данными.

Повышение эффективности и надежности эксплуатации плавающих машин является важной научно-технической проблемой. Различные аспекты проблемы определения водоходных характеристик плавающей техники рассмотрены в работах А. П. Степанова, Н. Г. Груздева, П. В. Аксенова, Ю. А. Кононовича, Л. Г. Бархударова, В. В. Киселева, Н. Г. Бородих и других авторов. Однако в этих работах не учитывалось влияние гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус машины при движении по воде. Это приводит к существенным погрешностям в расчетах водоходных параметров плавающих машин.

Из-за сложной и плохообтекаемой формы корпуса такой техники не представляется возможным получить аналитическое решение для определения гидродинамических сил и моментов, действующих на машину при движении по воде. Поэтому в инженерной практике используют приближенные методы расчета с грубыми допущениями, которые базируются на эмпирических зависимостях, полученных по результатам экспериментальных исследований.

Несмотря на важность этой проблемы до настоящего времени в полной мере она не изучена, очень мало публикаций по гидродинамике плавающих машин, практически нет обоснованных методов расчета водоходных характеристик плавающих машин.

Для восполнения этого пробела в лаборатории кафедры «Теория и проектирование корабля» Одесского национального морского университета автором были проведены испытания модели ПМ в аэродинамической трубе (подробно описанные в работе [3]), которые позволили установить закономерности распределения давления воздушного пото-

ка по поверхности корпуса модели при разных скоростях продувки, ориентациях машины в горизонтальной и вертикальной плоскостях. По данным испытаний построены эпюры давления воздушного потока на каждый элемент конструкции подводной части корпуса машины по разным сечениям и направлениям.

На основании результатов аэродинамических испытаний модели ПМ и положений теории подобия и размерностей разработаны методы расчета гидродинамических сил и моментов, действующих на элементы подводной части корпуса плавающей машины.

В данной статье рассматривается только расчет гидродинамической силы, действующей на днище машины.

В расчете принимается, что днище плавающей машины имеет форму плоской прямоугольной плиты параллельной горизонтальной плоскости. При движении ПМ на днище действует гидродинамическое давление воды, интенсивность которого по длине корпуса изменяется нелинейно. В передней части днища интенсивность давления имеет максимальное значение, а в кормовой – минимальное. Величина гидродинамической силы, действующей на днище корпуса машины ( $F_d$ ), зависит от скорости движения ( $v_{пм}$ ), характерной длины днища ( $L_d$ ), углов наклона плоскостей носовой части ( $\alpha_n$ ) и днища ( $\beta_d$ ).

В качестве факторов, существенно влияющих на величину  $F_d$  примем  $v_m$ ,  $S_d$ ,  $\alpha_n$  и  $\beta_d$ , а в качестве функции отклика - величину силы  $F_d$ :

$$F_d = f(v_{пм}; L_{пм}; \alpha_n; \beta_d). \quad (1)$$

Зависимость (1) в общем случае может быть представлена в виде четырехмерной поверхности. Диапазон изменений и значений принятых факторов приведен в табл. 1.

Таблица 1  
Значения факторов, влияющих на величину силы  $F_d$

Факторы влияния	$v_{пм}$ (м/с) (Re)	$L_{пм}$ (м)	$\alpha_d$ ( $^\circ$ )/(шаг $6^\circ$ )	$\beta_d$ ( $^\circ$ )/(шаг $6^\circ$ )
код значение				
-1	0 (0)	5,6	34	+6 на нос
0	1,666668 (1,1E-05)	8,65	40	0
1	3,333336 (2,77E-05)	10,87	46	-6 на нос

В таблице 2 приведены значения силы  $F_d$ , действующей на днище ПМ в зависимости от  $v_{\text{пм}}$ ,  $L_{\text{пм}}$ ,  $\alpha_n$  и  $\beta_d$ .

Как видно из графиков, величина силы  $F_d$  имеет отрицательное значение во всем диапазоне, это свидетельствует о разряжении давления под днищем ПМ. С увеличением  $v_{\text{пм}}$   $F_d$  возрастает. Максимальная величина силы давления равна  $F_d = -65,38$  кН при следующих значениях:  $L_{\text{пм}} = 10,87$  м (+1) при  $v_{\text{пм}} = 1,83 \times 10^{-5} \text{ Re} (+1)$ ;  $\alpha_n = 34^\circ$  и  $\beta_d = -6^\circ$ .

Для предварительной оценки влияния принятых факторов на исследуемую функцию  $F_d$  построены графики, которые показаны на рис. 2.

План проведения эксперимента представлен в табл. 3. Предварительный анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2 показал, что аппроксимация может быть произведена полным полиномом при четырех аргументах (четвертой степени) вида:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + \dots + a_{n-2} x_3^4 + a_{n-1} x_4^4 + a_n x_1 x_2 x_3 x_4. \quad (2)$$

Такой полином содержит 70 слагаемых, что создаст очень громоздкую модель. Для уменьшения количества слагаемых используется метод последовательного усложнения математической зависимости.

В качестве регрессионных моделей принимались частные полиномы от полного (2). Критерием оценки качества математической модели (ММ) принималась погрешность вычисления функции отклика (точность не менее 5%).

Коэффициенты регрессии определялись итерационным квази-Ньютоновским методом [8] с заданным критерием конвергенции, равным 0,0001.

Результаты вычислений коэффициентов регрессии конкурирующих ММ приведены в табл. 4.

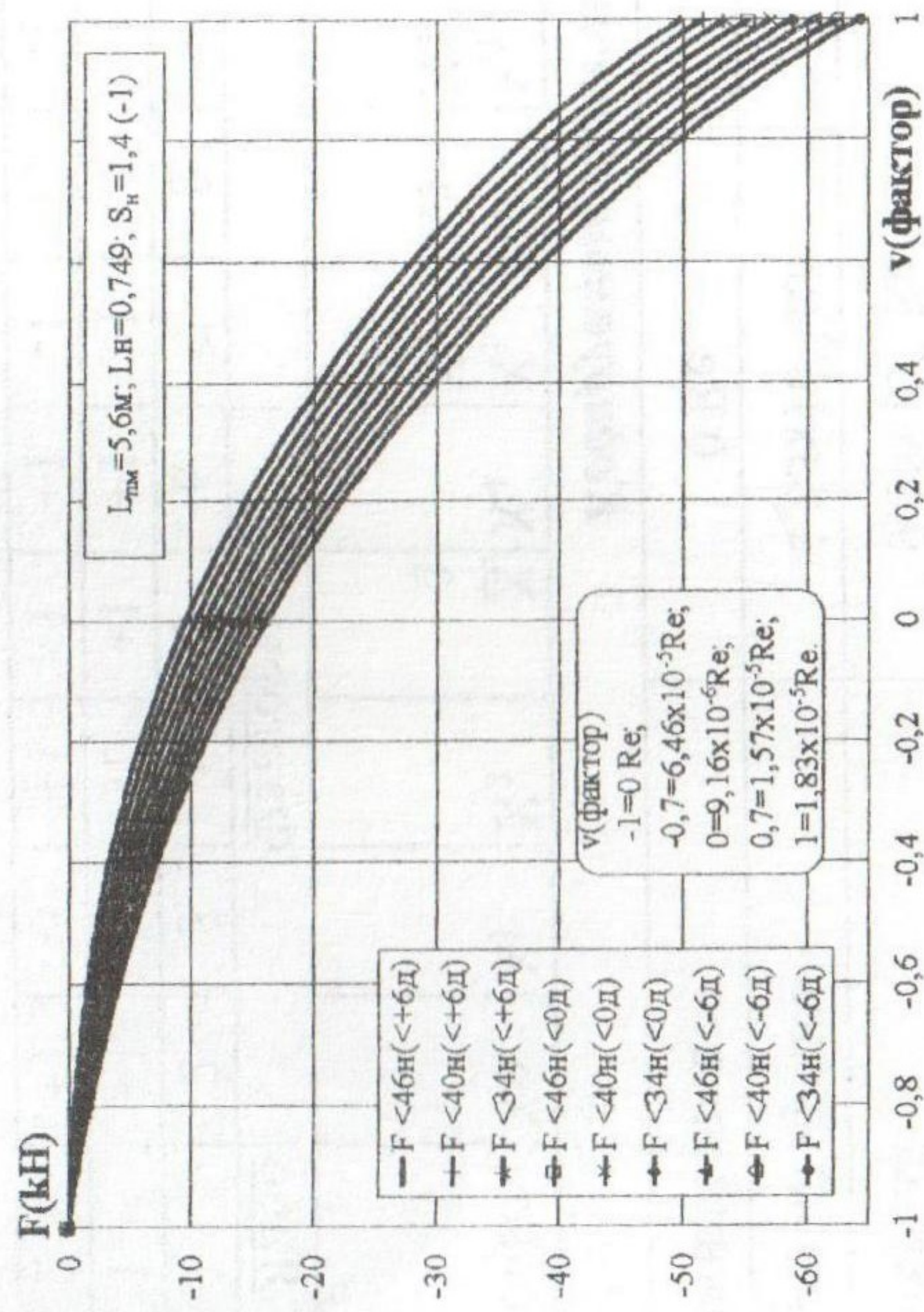
Оценка точности вычислений величины гидродинамической силы  $F_d$ , действующей на днище ПМ, проводилась с использованием рассматриваемых ММ в точках плана эксперимента с последующим их сравнением с экспериментальными данными, результаты вычислений приведены в табл. 5.

Таблица 2

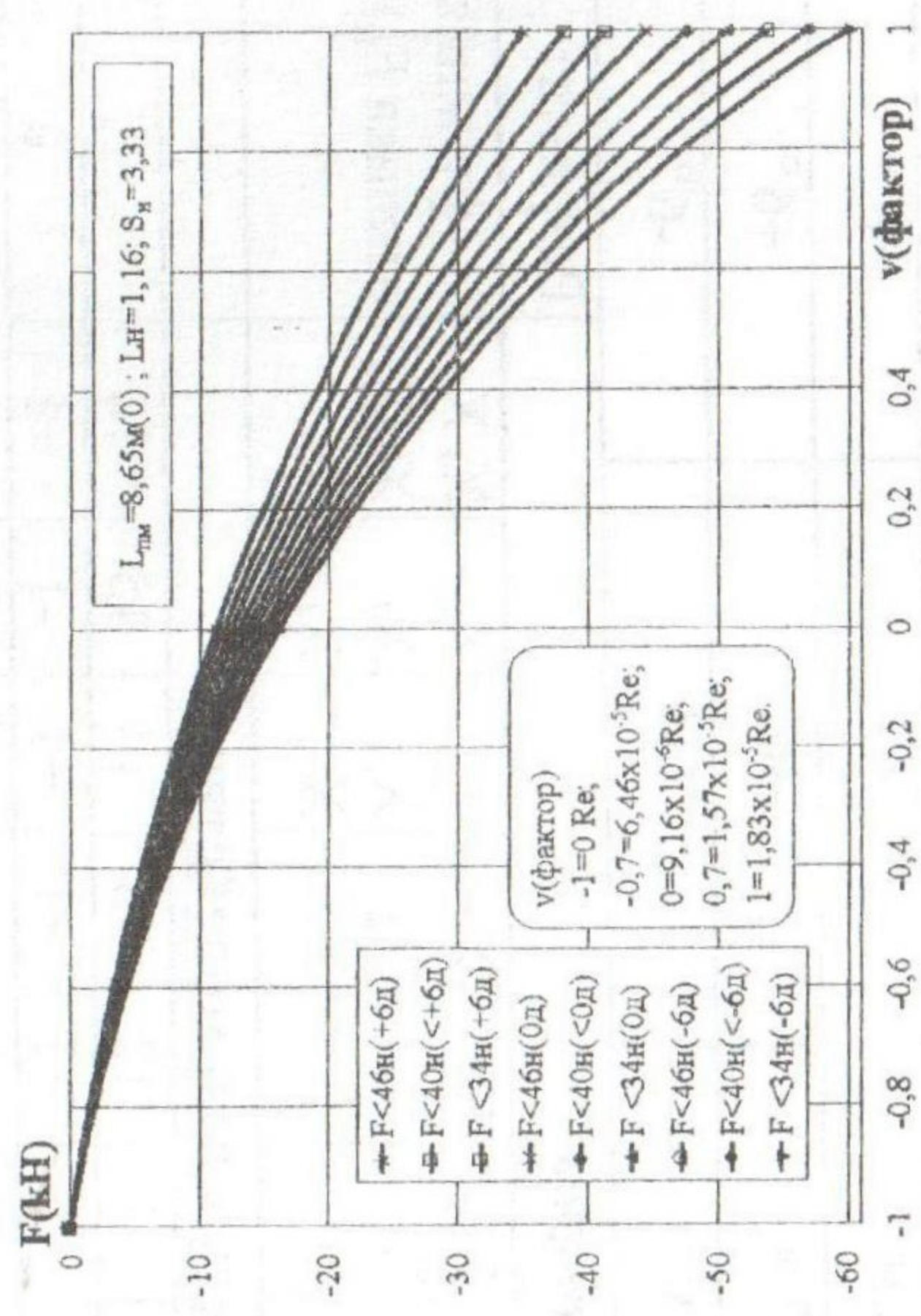
Значения силы  $F_d$  в зависимости от  $V_{гкм}$  и углов  $\alpha_{н}$ ,  $\beta_d$

V(фактор)	Величина угла наклона носовой части ( $\alpha_n$ ) и днища ( $\beta_d$ ) относительно потока										
	L <sub>пм</sub> =5,6м(-1);										
	$\alpha=46^\circ_n$ $\beta_d=+6д$	$\alpha=40^\circ_n$ $\beta_d=+6д$	$\alpha=34^\circ_n$ $\beta_d=+6д$	$\alpha=46^\circ_n$ $\beta_d=0д$	$\alpha=40^\circ_n$ $\beta_d=0д$	$\alpha=34^\circ_n$ $\beta_d=0д$	$\alpha=46^\circ_n$ $\beta_d=-6д$	$\alpha=40^\circ_n$ $\beta_d=-6д$	$\alpha=34^\circ_n$ $\beta_d=-6д$	$\alpha=40^\circ_n$ $\beta_d=-6д$	$\alpha=34^\circ_n$ $\beta_d=-6д$
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-9,48	-10,2863	-11,0925	-11,8988	-12,705	-13,5113	-14,3175	-15,1238	-15,93	-15,93	-15,93
1	-49,74	-51,5688	-53,3975	-55,2263	-57,055	-58,8838	-60,7125	-62,5413	-64,37	-64,37	-64,37
	L <sub>пм</sub> =8,65м(0);										
0	-11,2	-11,8	-12,4	-13	-13,6	-14,2	-14,8	-15,4	-16	-16	-16
1	-35	-38,1375	-41,275	-44,4125	-47,55	-50,6875	-53,825	-56,9625	-60,1	-60,1	-60,1
	L <sub>пм</sub> =10,87м(1)										
0	-9,65	-10,5225	-11,395	-12,2675	-13,14	-14,0125	-14,885	-15,7575	-16,63	-16,63	-16,63
1	-36,3	-39,935	-43,57	-47,205	-50,84	-54,475	-58,11	-61,745	-65,38	-65,38	-65,38

а)



б)



в)

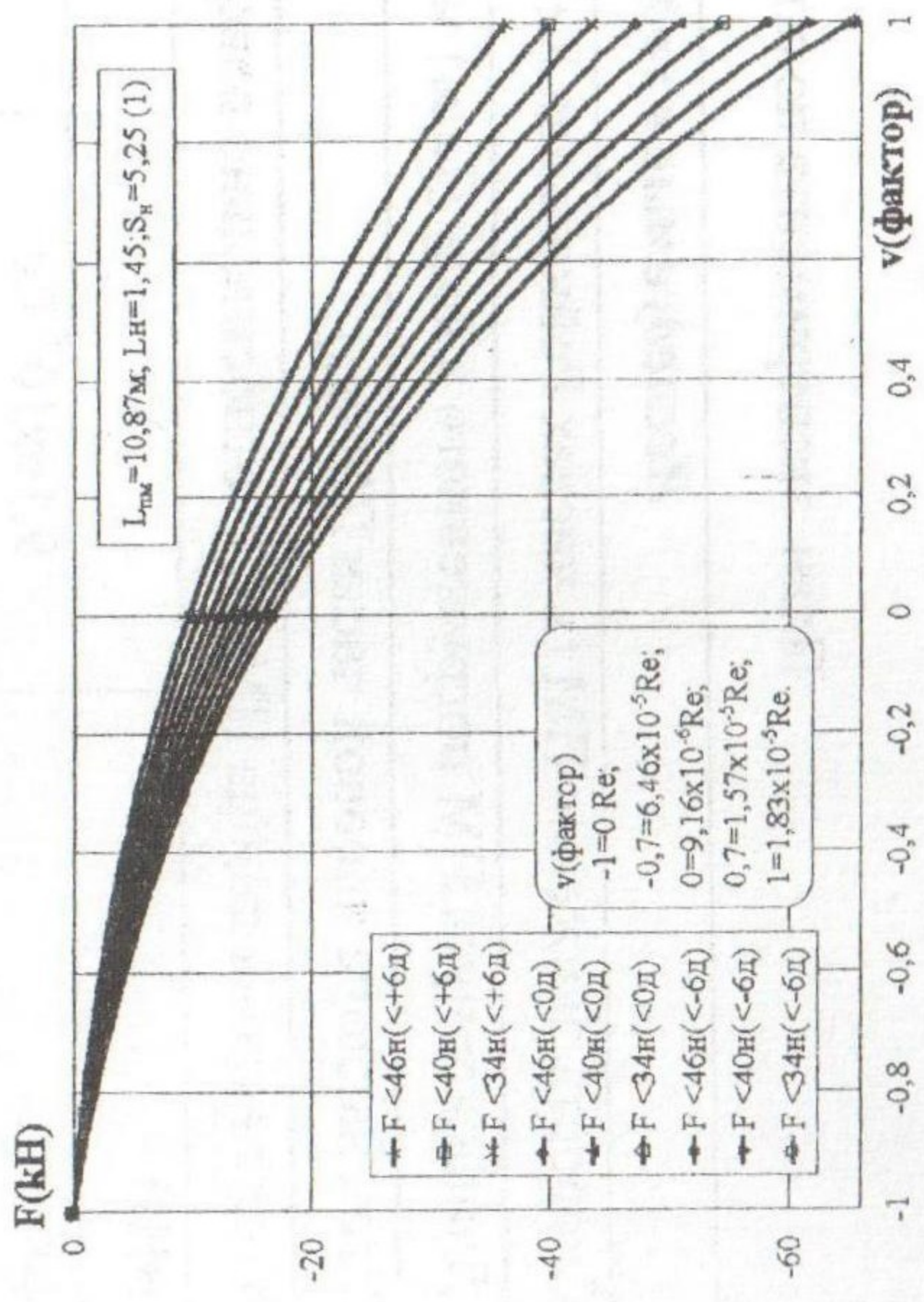


Рис. 1. Изменение силы (Fд) в зависимости от скорости движения ( $v_{ПМ}$ ), углов наклона плоскостей носовой части ( $\alpha_{н}$ ) и днища ( $\beta_{д}$ ) при фиксированной длине машины: а)  $L_{ПМ} = 5,6 \text{ м} (-1)$ ; б)  $L_{ПМ} = 8,65 \text{ м} (0)$ ; в)  $L_{ПМ} = 10,87 \text{ м} (1)$ .

План эксперимента по определению величины силы  $F_d$ 

<i>Исследуемые в ходе эксперимента факторы</i>																		
$X_1$ - Скорость движения ПМ (в числах Рейнольдса $Re$ )																		
$X_2$ - Длина корпуса ПМ погруженного в воду (Лпм) м																		
$X_3$ - Угол наклона носовой части ПМ ( $\alpha_n$ ) °																		
$X_4$ - Угол наклона днища ПМ ( $\beta_d$ ) ° относительно поверхности воды																		
УРОВНИ	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$														
Основной	$9,16 \times 10^{-6} Re$	8,65 м	40°	0°														
Интервал	$9,16 \times 10^{-6} Re$	2,22 м	6°	6°														
Верхний предел	$1,83 \times 10^{-5} Re$	10,87 м	46°	+6°														
Нижний предел	0 $Re$	5,6 м	34°	-6°														
<i>Кодируемые значения факторов</i>																		
№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$\bar{X}$ 3	$X_4$	$X_1$ $X_2$	$X_1$ $X_3$	$X_2$ $X_3$	$X_1$ $X_4$	$X_2$ $X_4$	$X_3$ $X_4$	$X_1$ $X_2$ $X_3$	$X_1$ $X_2$ $X_4$	$X_2$ $X_3$ $X_4$	$X_1 X_2$ $X_3 X_4$	Результат		
																	$Y$ (функция отклика $F_H$ )	
<i>Факторы</i>													<i>Эффекты взаимодействия</i>					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	0		
2	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	0		

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-53,4
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-36,3
5	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	0
6	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0
7	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-49,74
8	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-43,57
9	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0
10	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	0
11	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-64,37
12	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-58,11
13	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	0
14	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	0
15	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-60,7
16	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-65,38
Центр	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,6

Таблица 4

## Коэффициенты регрессии конкурирующих математических моделей

Коэффициенты регрессии ММ (1): $y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1X_2 + a_6X_1X_3 + a_7X_1X_4 + a_8X_2X_3 + a_9X_2X_4 + a_{10}X_3X_4 + a_{11}X_1X_2X_3 + a_{12}X_1X_3X_4 + a_{13}X_1X_2X_4 + a_{14}X_2X_3X_4$							
Const. $a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
-26,9198	-27,8474	2,427391	0,961987	4,593842	1,958013	1,05706	0,760439
$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	
4,416912	0,763584	0,686488	1,229817	1,128901	-0,31941	-0,74861	-
Коэффициенты регрессии ММ (2): $y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4$							
Const. $a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$			
-26,1865	-26,9731	1,553141	1,366891	4,096894			
Коэффициенты регрессии ММ (3): $y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1X_2 + a_6X_1X_3 + a_7X_1X_4 + a_8X_2X_3$							
Const. $a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
-13,6	-26,9731	1,553093	1,366877	4,096851	-5,82332	-5,82332	-5,82333



Продолжение таблицы 4

Коэффициенты регрессии ММ (4): $y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_3^2 + a_8X_4^2 + a_9X_1X_2 + a_{10}X_2X_3 + a_{11}X_2X_3 + a_{12}X_3X_4 + a_{13}X_1X_4 + a_{14}X_2X_4$							
Const. $a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
-13,6	-26,9731	1,553126	1,366875	4,096876	-3,34328	-3,34328	-3,34328
$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	
-3,34328	1,553126	1,366875	0,450626	-0,00062	4,096876	1,355625	-
Коэффициенты регрессии ММ (5): $y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_3^2 + a_8X_4^2 + a_9X_1X_2 + a_{10}X_2X_3 + a_{11}X_1X_2X_3 + a_{12}X_3X_4 + a_{13}X_1X_4 + a_{14}X_2X_4 + a_{15}X_1X_2X_3 + a_{16}X_2X_3X_4 + a_{17}X_1X_3X_4 + a_{18}X_1X_2X_3X_4$							
Const. $a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
-13,6	-26,9731	1,553128	1,366864	4,096874	-3,34328	-3,34328	-3,34328
$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
-3,34328	1,553124	1,366879	0,450615	-0,00062	4,096883	1,355636	0,450615
$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$					
0,000622	-0,00064	0,000622					

## Оценка точности вычисления величины гидродинамической силы Fд

Точное значение Y	№ оцениваемой математической модели										
	Модель №1		Модель №2		Модель №3		Модель №4		Модель №5		Ошибка ΔY
	Знач-е Y <sub>ММ</sub>	Ошибка ΔY	Знач-е Y <sub>ММ</sub>	Ошибка ΔY	Знач-е Y <sub>ММ</sub>	Ошибка ΔY	Знач-е Y <sub>ММ</sub>	Ошибка ΔY	Знач-е Y <sub>ММ</sub>	Ошибка ΔY	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	1,63202	-1,63202	4,69729	-4,69729	3,91063	-3,91063	-1,80689	1,80689	-1,35566	1,35566	
0	0,65732	-0,65732	5,06979	-5,06979	4,28307	-4,28307	0,90561	-0,90561	1,35561	-1,35561	
-53,4	-51,5598	-1,84015	-51,9828	-1,41723	-52,7694	-0,63058	-52,4969	-0,90309	-52,0444	-1,35558	
-36,3	-35,8508	-0,4492	-46,1427	9,84271	<b>-46,9295</b>	<b>10,6295</b>	-38,1069	1,80690	<b>-37,6557</b>	<b>1,35569</b>	
0	0,36884	-0,36884	1,96351	-1,96351	1,17688	-1,17688	-0,90439	0,90439	-1,35567	1,35567	
0	1,75979	-1,75979	7,80357	-7,80357	7,01682	-7,01682	1,80561	-1,80561	1,35562	-1,35562	
-49,74	-50,2511	0,51106	-49,249	-0,49101	-50,0357	0,29566	<b>-47,9319</b>	<b>-1,80809</b>	-48,3844	-1,35559	
-43,57	-43,1063	-0,46365	-48,8765	5,30649	-49,6632	6,09323	-44,4744	0,90441	-44,9256	1,3556	
0	0,03295	-0,03295	-3,4965	3,4965	-4,28307	4,28307	0,90561	-0,90561	1,35559	-1,35559	
0	1,00766	-1,00766	-3,124	3,124	-3,91064	3,91064	-1,80689	1,80689	-1,3556	1,35561	
-64,37	-64,5452	0,17518	-60,1766	-4,19344	-60,9631	-3,40688	-66,1744	1,80441	-65,7257	1,35568	
-58,11	-56,8942	-1,21578	-54,3365	-3,77351	-55,1232	-2,98682	-57,2044	-0,90559	-56,7544	-1,35557	

Продолжение таблицы 5

Точное значение		№ оцениваемой математической модели														
		Модель №1			Модель №2			Модель №3			Модель №4			Модель №5		
		Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	Знач-е У <sub>мм</sub>	Ошибка ΔУ	
0	1,29614	-1,29614	-6,23028	6,23028	-7,01682	7,01682	1,80561	-1,80561	-1,35566	1,35566	-0,90439	0,90439	-1,35566	1,35566		
0	-0,09481	0,09481	-0,39022	0,39022	-1,17688	1,17688	-0,90439	0,90439	-1,35567	1,35567	-0,90439	0,90439	-1,35567	1,35567		
-60,7	-58,524	-2,17604	-57,4428	-3,25722	-58,2294	-2,47064	-61,6069	0,90692	-62,0556	1,35564	-63,5744	-1,80559	-64,0244	-1,35558		
-65,38	-64,1787	-1,20133	-57,0703	-8,30972	-57,8569	-7,52307	-63,5744	-1,80559	-64,0244	-1,35558	-63,5744	-1,80559	-64,0244	-1,35558		
-13,6	-26,9198	13,3198	-26,1865	12,5865	-13,6	2,57E-05	-13,6	1,34E-05	-13,6	1,34E-05	-13,6	1,34E-05	-13,6	1,34E-05		

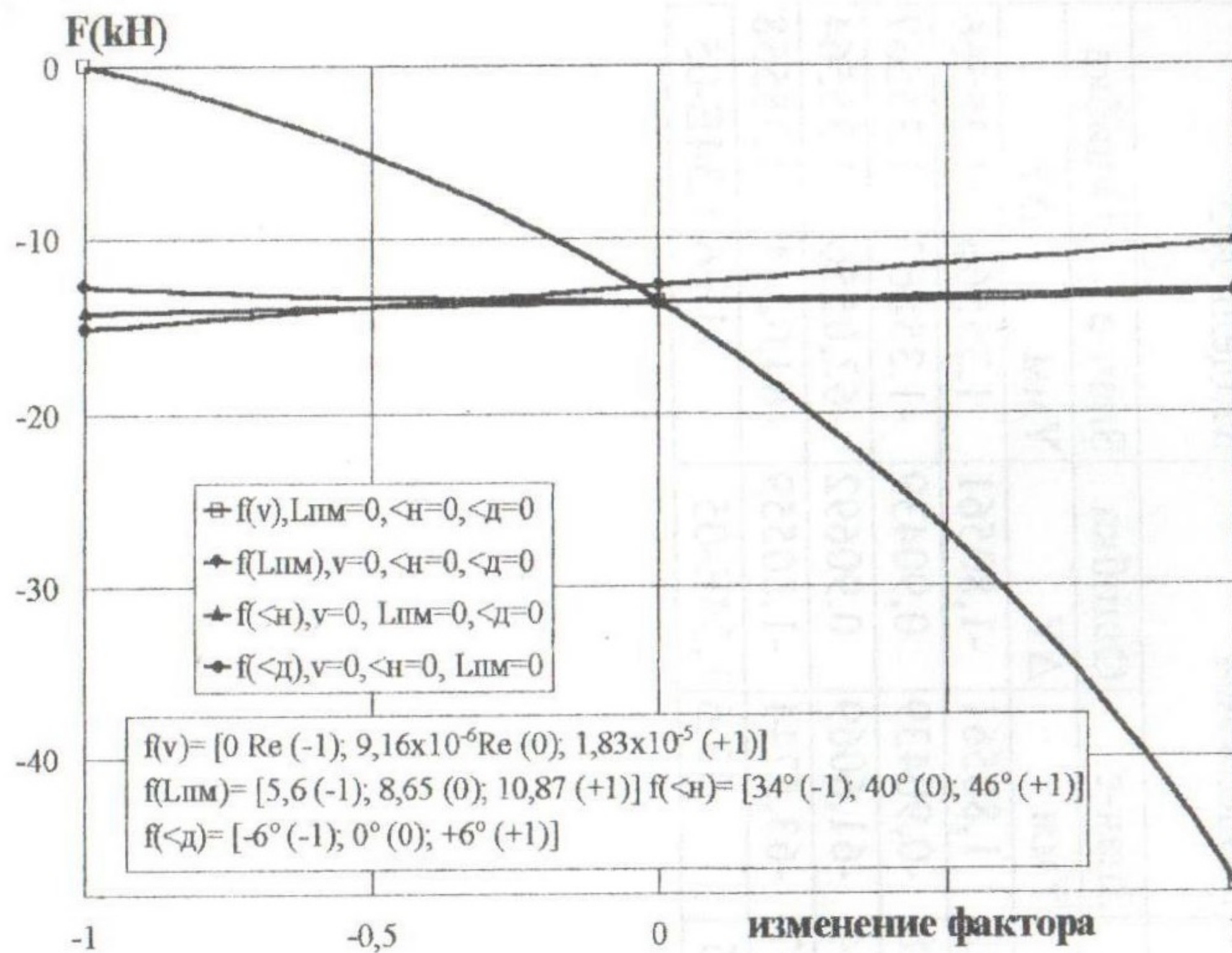


Рис 2. Графики влияния факторов  $v$ ,  $L_{пм}$ ;  $\alpha_n$  (на графике -  $n$ );  $\beta_d$  (на графике -  $d$ ) на исследуемую функцию отклика  $F_d$

Анализ полученных результатов показал, что первые две математические модели не могут быть использованы в расчетах, так как максимальная погрешность для точек в центре плана составляет около 100%, что недопустимо.

Математическая модель №3 также не обеспечивает необходимую точность в расчетах для точек, расположенных на краю плана, ошибка составляет до 22%. Поэтому она не может быть использована в расчетах. Модели №4, №5 удовлетворяют необходимой точности вычислений (для ММ №4 погрешность составила около 3,8%, для ММ №5 ~ 3,6%) и могут быть рекомендованы для расчетов. Более предпочтительна модель №4 в связи с тем, что она состоит из 14 элементов, что на четыре элемента меньше, чем у модели №5. Во всех остальных аспектах эти модели равнозначны.

Сравнительный анализ показал, что использовать ММ без учета эффектов взаимодействия недопустимо в связи с тем, что они оказывают существенное влияние на весь процесс гидродинамического взаимодействия днища ПМ и движущейся воды.

Для оценки адекватности принятой модели был построен график остатков в логарифмическом масштабе, который приведен на рисунке 3.

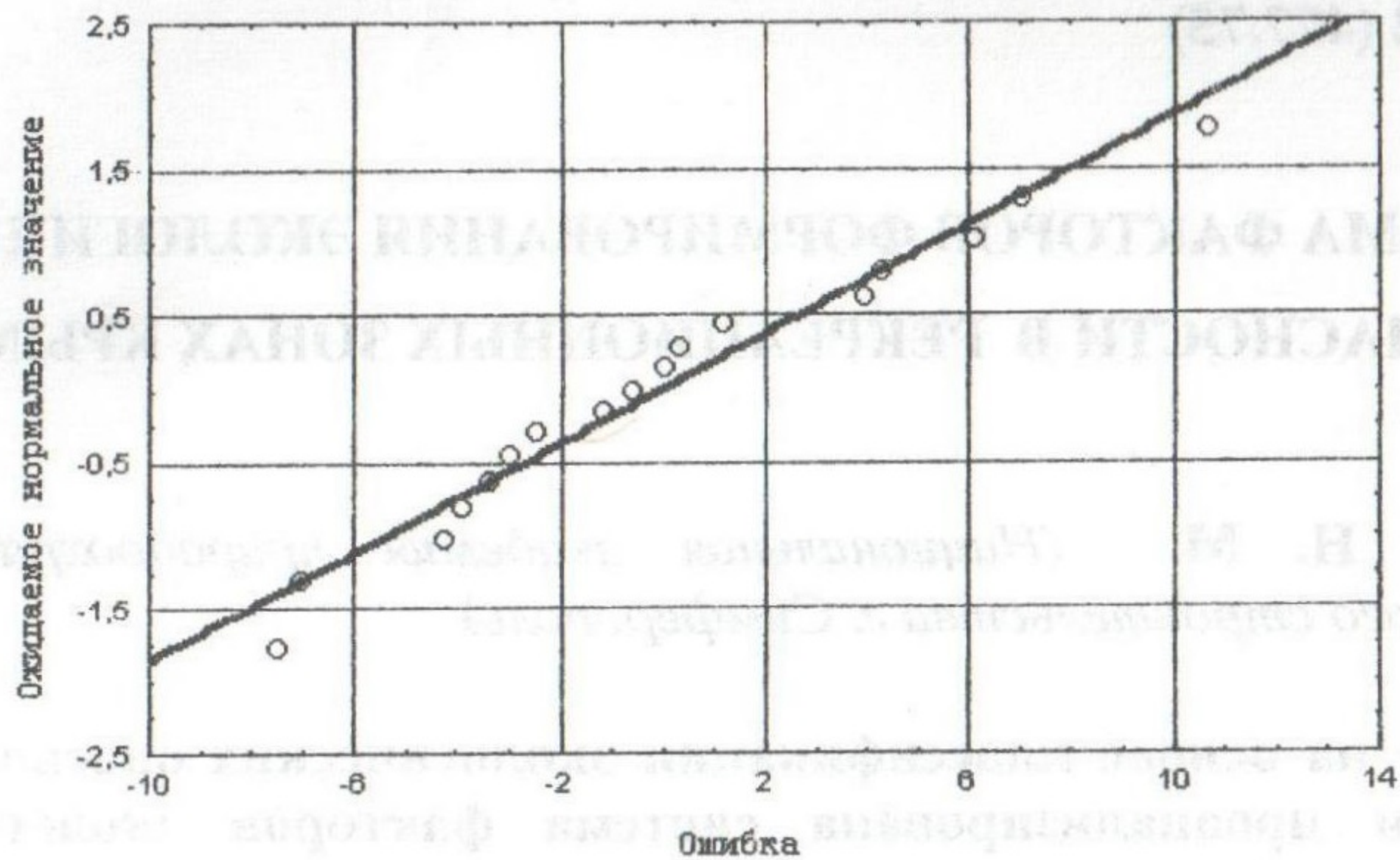


Рис. 3. График погрешностей величины гидродинамической силы  $F_d$ , полученный при использовании ММ №4.

**Вывод.** Предложенная математическая модель с достаточной для инженерных задач точностью описывает изменение величины  $F_d$  в зависимости от скорости движения ПМ и её конструктивных особенностей и может быть рекомендована для использования в расчетах ходового дифферента ПМ.

#### Литература

1. Степанов А.П. Конструкция и расчет плавающих машин. - М.: Машиностроение, 1978. -232.С.
2. Степанов А.П. Методика расчета основных водоходных качеств плавающих машин. Навчальний посібник. М. АБТВ, 1971.- 41 С.
3. Бугаев С.В. Аэродинамические исследования распределения давления по контуру погруженной части плавающей машины.// Вісник ОДМУ – 1999.- №4.С.85-93.
4. Бугаев С.В. Плавающая машина. Теория и эксперимент.- Одеса, Друк. ОДМУ., 2000.-253 С.
5. Крьжний А.В., Бугаев С.В. Изучение конструктивных особенностей плавающей техники с использованием ПЭВМ. // Матеріали 5-ї міжнарод. наук.-метод. конф. "Удосконалення підготовки спеціалістів"- Одеса: ОДАБА, 2000.- С.
6. Методы подобия и размерности в механике. М.,: Наука, 1967.- 148 С.
7. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий М.: Наука, 1976.- 69-154 С.
8. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Statistica статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М: «Филинь», 1997. - 583 С.