

ОЦЕНКА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ДНИЩЕ ПЛАВАЮЩЕЙ МАШИНЫ

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

Приведены результаты аэродинамических испытаний модели плавающей машины. Установлены закономерности распределения потока воздуха по поверхности подводной части корпуса машины. Предложена методика определения гидродинамического момента, действующего на днище плавающей машины.

Проблема расчета гидродинамических сил и моментов, действующих на плохообтекаемые плавающие машины при движении по воде, изучена недостаточно. Некоторые исследования [1,2] далеки от практической реализации, другие [3] основаны на слишком грубых упрощающих допущениях. До настоящего времени отсутствует достаточно обоснованное теоретическое решение этой проблемы.

Не лучше обстоит дело и по экспериментальным исследованиям. В известных работах [3,4], посвященных испытаниям плавающих машин (ПМ) в лабораторных и натуральных условиях, не рассматривались вопросы влияния гидродинамического ходового дифферента на водоходные характеристики плавающей техники, не изучались закономерности распределения давления воды по смоченной поверхности корпуса машины, а также возникновение и развитие гидродинамических сил и моментов.

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

Для восполнения решения этой проблемы в лаборатории кафедры «Теория и проектирование корабля» Одесского национального морского университета автором были проведены испытания модели ПМ в аэродинамической трубе [6], которые позволили установить закономерности распределения давления воздушного потока по поверхности

подводной части корпуса модели при разных скоростях продувки, ориентациях машины в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

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 гидродинамического момента, действующего 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 гидродинамического момента, действующего на днище корпуса машины (M_d), зависит от скорости движения ($v_{пм}$), характерной длины днища (L_d), углов наклона плоскостей носовой части (α_n) и днища (β_d).

В качестве факторов, существенно влияющих на величину M_d примем v_m , S_d , α_n и β_d , а в качестве функции отклика - величину момента M_d :

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

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

В таблице 2 приведены значения момента M_d , действующей на днище ПМ в зависимости от $v_{пм}$, $L_{пм}$, α_n и β_d .

Анализ приведенных на рис.1 графиков показал, что аппроксимация может быть произведена полным полиномом при четырех аргументах вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \dots + a_{n-2}x_3^4 + a_{n-1}x_4^4 + a_nx_1x_2x_3x_4. \quad (2)$$

Такой полином содержит 70 слагаемых, что создает весьма громоздкую модель. Для уменьшения количества слагаемых применен метод последовательного усложнения математической зависимости [7]. В качестве регрессионных моделей принимались частные полиномы (2).

Таблица 1

Значения факторов, влияющих на величину момента Мд.

Факторы влияния код значение	$V_{\text{пм}}(\text{м/с}) (\text{Re})$	$L_{\text{пм}}(\text{м})$	$\alpha_{\text{д}}(^{\circ}) / (\text{шаг } 6^{\circ})$	$\beta_{\text{д}}(^{\circ}) / (\text{шаг } 6^{\circ})$
-1	0 (0)	5,6	34	+6 на нос
0	1,666668 (1,1E-05)	8,65	40	0
1	3,3333336 (2,77E-05)	10,87	46	-6 на нос

Таблица 2.

Значения момента Мд, действующего на днище ПМ, в зависимости от $V_{\text{пм}}$, $L_{\text{пм}}$, $\alpha_{\text{н}}$ и $\beta_{\text{д}}$

$v(\text{фактор})$	Величина угла наклона носовой части ($\alpha_{\text{н}}$) и днища ($\beta_{\text{д}}$) относительно направления потока											
	$L_{\text{пм}}=5,6\text{м}(-1);$											
	$\alpha=46^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=+6\text{д}$	$\alpha=40^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=+6\text{д}$	$\alpha=34^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=+6\text{д}$	$\alpha=46^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=0\text{д}$	$\alpha=40^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=0\text{д}$	$\alpha=34^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=0\text{д}$	$\alpha=46^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$	$\alpha=40^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$	$\alpha=34^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$	$\alpha=46^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$	$\alpha=40^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$	$\alpha=34^{\circ}\text{н}$ $\beta_{\text{д}}=-6\text{д}$
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-9,7	-10,8188	-11,9375	-13,0563	-14,175	-15,2938	-16,4125	-17,5313	-18,65	-19,7698	-20,8885	-22,0072
1	-38,52	-43,4354	-48,3508	-53,2661	-58,1815	-63,0969	-68,0123	-72,9276	-77,843	-82,7583	-87,5836	-92,4089
	$L_{\text{пм}}=8,65\text{м}(0);$											
0	-12,35	-14,0488	-15,7475	-17,4463	-19,145	-20,8438	-22,5425	-24,2413	-25,94	-27,6385	-29,336	-31,0335
1	-56,72	-63,1488	-69,5775	-76,0063	-82,435	-88,8638	-95,2925	-101,721	-108,15	-114,5385	-120,376	-126,1145
	$L_{\text{пм}}=10,87\text{м}(1)$											
0	-2,53	-7,21375	-11,8975	-16,5813	-21,265	-25,9488	-30,6325	-35,3163	-40	-44,6837	-48,65	-52,2163
1	-25	-41,3125	-57,625	-73,9375	-90,25	-106,563	-122,875	-139,188	-155,5	-171,7013	-188,1145	-204,3277

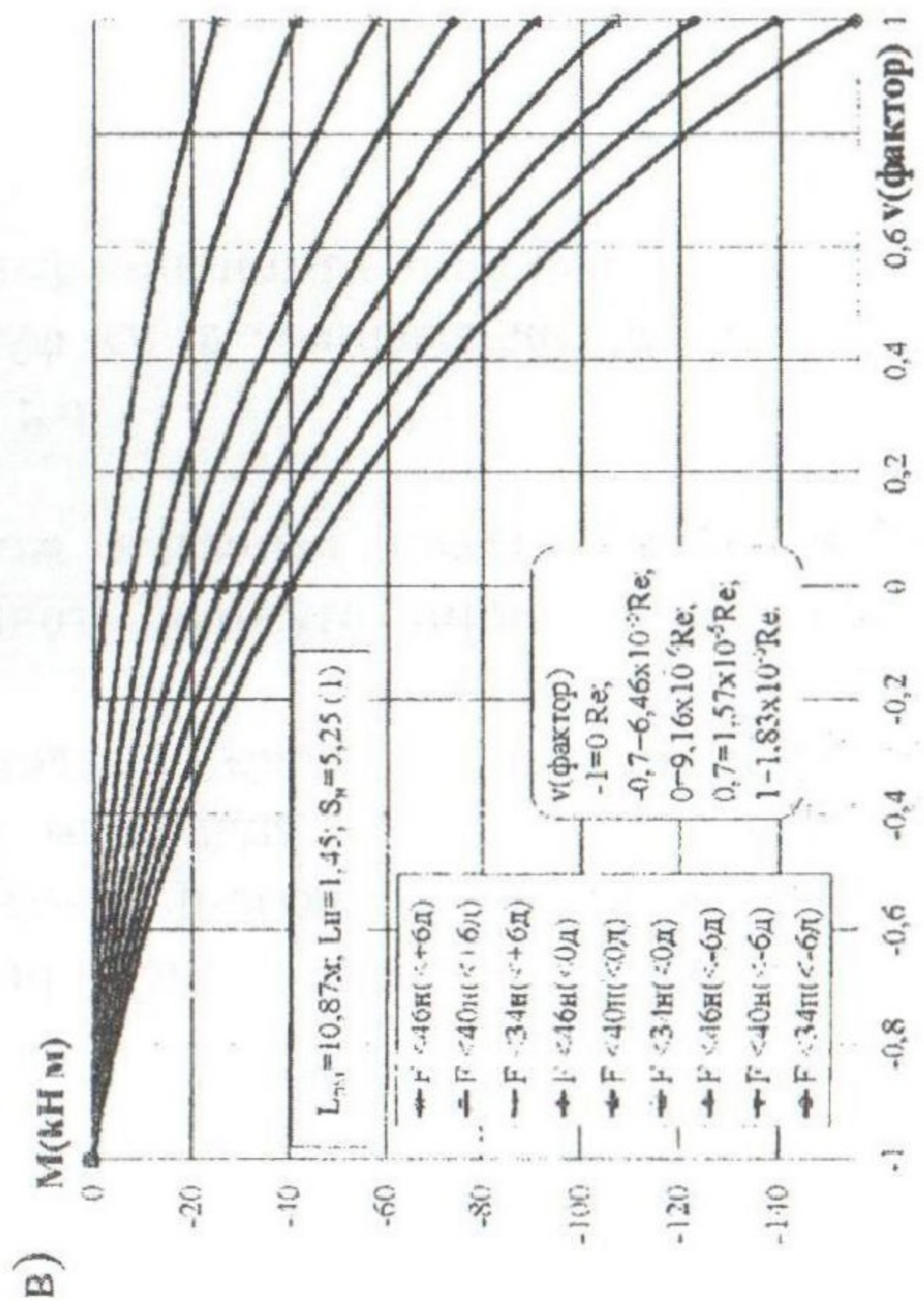
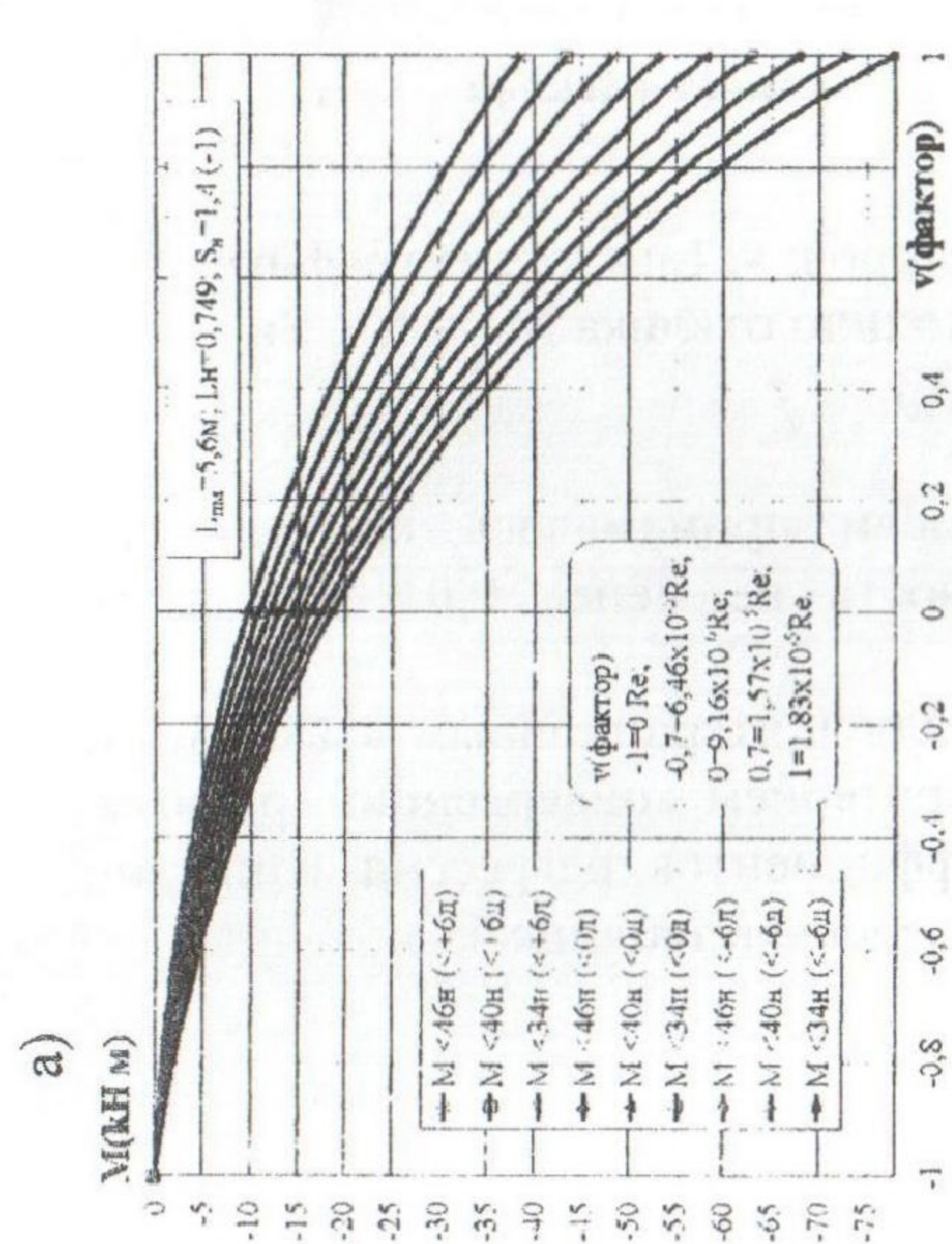
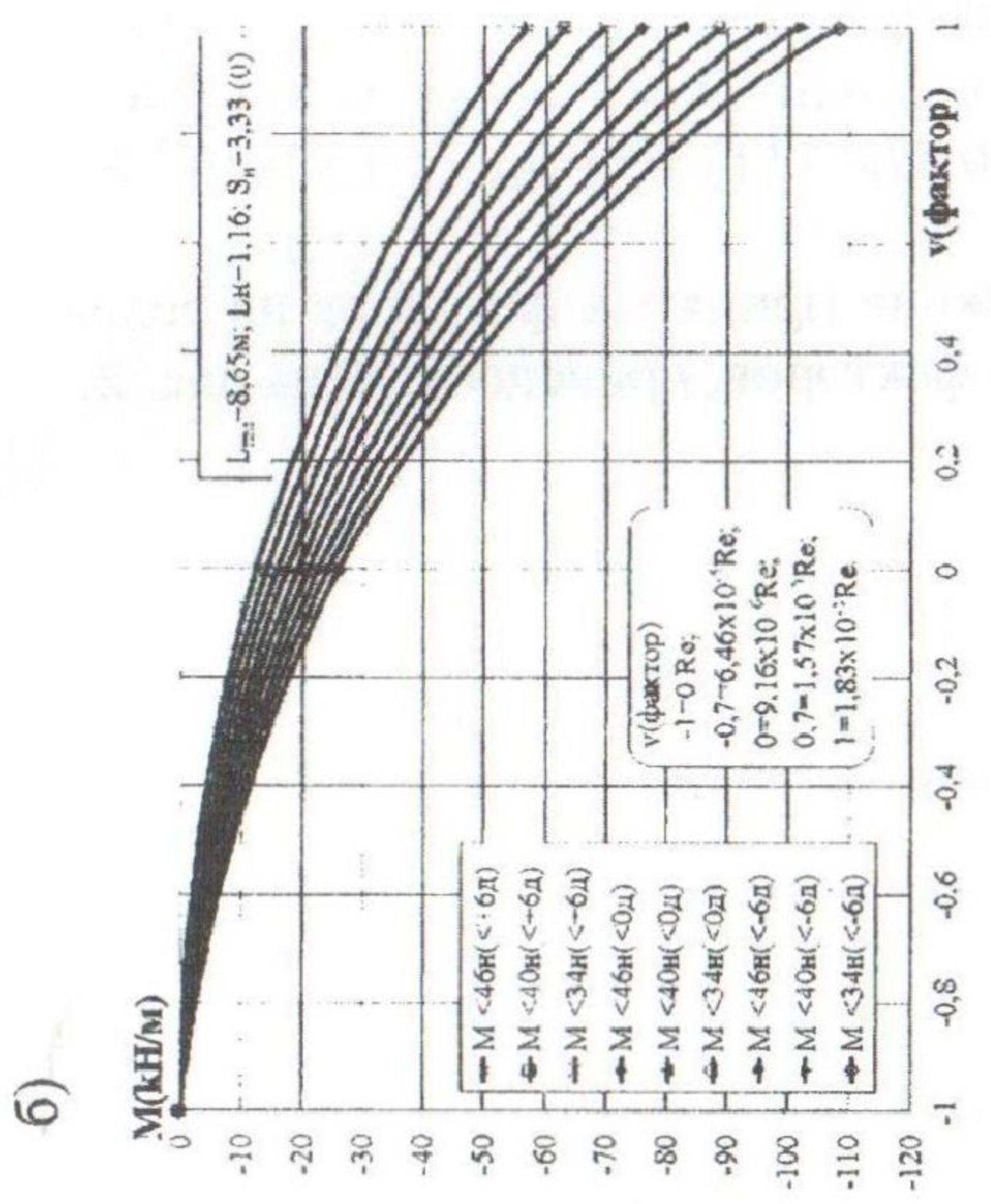


Рис.1.Изменение величины момента (Мд) в зависимости от скорости движения (v_{PM}), углов наклона плоскости носовой части (α_H) и днища (β_D) при фиксированной длине машины: а) $L_{PM}=5,6$ м (-1); б) $L_{PM}=8,65$ м (0); в) $L_{PM}=10,87$ м (1).

Из приведенных графиков видно, что величина момента M_d имеет отрицательное значение во всем рассматриваемом диапазоне, это свидетельствует о возникновении вакуума под днищем ПМ. С увеличением $v_{пм}$ отрицательное значение M_d возрастает и имеет вид степенной функции. Максимальное по модулю отрицательное значение M_d равно $-155,5$ кН/м и соответствует $L_{пм}=10,87$ м (+1) при $v_{пм} = 1,83 \times 10^{-5}$ Re (+1); $\alpha_n = 34^\circ$ и $\beta_d = -6^\circ$.

Для предварительной оценки влияния принятых факторов на величину M_d построен график изменения факторов, приведенный на рис. 2.

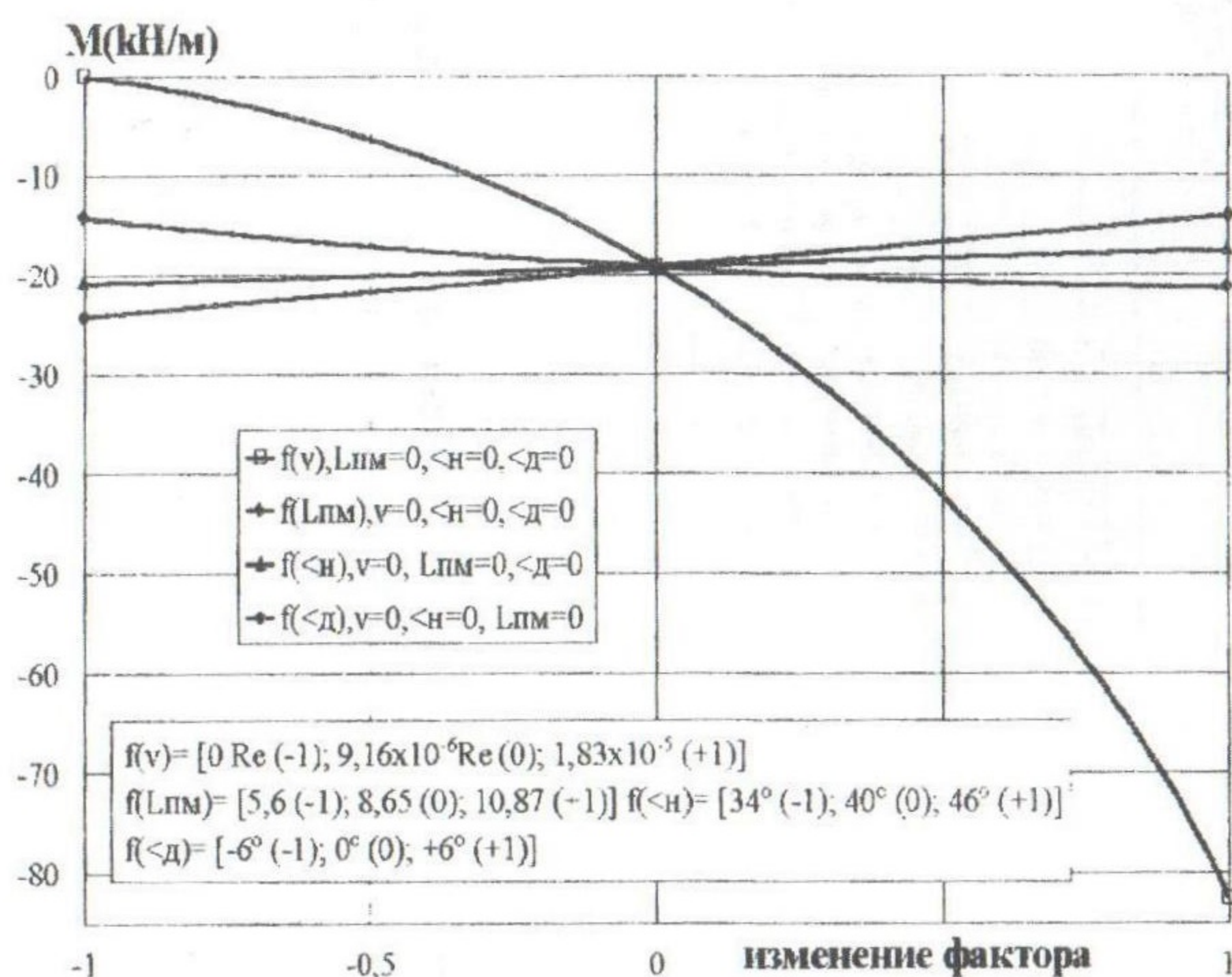


Рис.2. Влияние изменения факторов: v , $L_{пм}$; α_n (на графике $<n>$); β_d (на графике $<d>$) на функцию отклика $M_d = f(v, S_n; \alpha_n; \beta_d)$

Критерием оценки качества модели принималась погрешность вычисления функции отклика (точность не менее 0,01% во всем диапазоне значений).

Коэффициенты регрессии определялись итерационным квази-Ньютоновским методом [7] с заданным критерием конвергенции, равным 0,0001. Результаты вычислений коэффициентов регрессии конкурирующих математических моделей приведены в таблице 4.

Таблица 3.

План проведения эксперимента по определению величины момента Мд

Исследуемые в ходе эксперимента факторы		УРОВНИ	
X_1 - Скорость движения плавающей машины (в числах Рейнольдса Re)	X_2	X_3	X_4
X_2 - Длина корпуса ПМ погруженного в воду (Лпм) м	8,65 м	40°	0°
X_3 - Угол наклона носовой части ПМ (α_n) °	2,22 м	6°	6°
X_4 - Угол наклона днища ПМ (β_d) ° относительно поверхности воды	10,87 м	46°	+6°
Основной	0 Re	34°	-6°
Интервал варьирования			
Верхний предел			
Нижний предел			

№ опыта	Кодируемые значения факторов																У (Функция отклика M_{II})	
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3		X_4
Ядро																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	11	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		
3	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-48,35		
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-25		

Таблица 4

Коэффициенты регрессии конкурирующих математических моделей

Коэффициенты регрессии ММ (1): $y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4$ мах. погрешность : 8436,2969721; R=,87503 дисперсия результатов: 76,568%					
Const.a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	
-36,0518	-37,1081	-8,01811	5,306893	15,92065	
Коэффициенты регрессии ММ (2): $y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_1 X_2 + a_6 X_1 X_3 + a_7 X_1 X_4 + a_8 X_2 X_3 + a_9 X_2 X_4 + a_{10} X_3 X_4$ мах. погрешность : 1602,5540846; R=,97749 дисперсия результатов: 95,549%					
Const.a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
-36,0518	-37,1081	-8,01813	5,306875	15,92062	-8,01813
a ₈	a ₉	a ₁₀			
2,849375	8,548125	0,000625			5,306875
					15,92063

Продолжение таблицы 4

<p>Коэффициенты регрессии ММ (3): $y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_1 X_2 + a_6 X_1 X_3 + a_7 X_1 X_4 + a_8 X_2 X_3 + a_9 X_2 X_4 + a_{10} X_3 X_4 + a_{11} + a_{11} X_2 X_3 + a_{12} X_3 X_4 + a_{13} X_1 X_4 + a_{14} X_2 X_4 + a_{15} X_1 X_2 X_3$ мах. погрешность : 303,52400337; R=,99578 дисперсия результатов: 99,157%</p>							
Const.a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
-36,0518	-37,1081	-8,01811	5,306889	15,92064	-8,01811	5,306889	15,92064
a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅
2,849389	8,548138	0,00064	2,849389	8,548138	0,00064	0,00064	0,00064
<p>Коэффициенты регрессии ММ (4): $y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_1 X_2 + a_6 X_1 X_3 + a_7 X_1 X_4 + a_8 X_2 X_3 + a_9 X_2 X_4 + a_{10} X_3 X_4 + a_{11} + a_{11} X_2 X_3 + a_{12} X_3 X_4 + a_{13} X_1 X_4 + a_{14} X_2 X_4 + a_{15} X_1 X_2 X_3 + a_{16} X_1^2 + a_{17} X_2^2 + a_{18} X_3^2 + a_{19} X_4^2$ мах. погрешность : 0,000000245; R=1,0000; дисперсия результатов: 100,00%</p>							
Const.a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇
-19,1496	-37,1081	-8,01811	5,306876	15,92061	-8,01813	5,306876	15,92061
a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅
2,849374	8,548112	0,000621	1,42468	4,274034	0,000316	0,000312	0,000314
a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉				
-2,24482	-2,24482	-2,24482	-2,24482				

Оценка точности вычислений величины момента M_d проводилась с использованием предложенных математических моделей при расчете в точках плана эксперимента и последующим их сопоставлением с данными табл. 5. Сравнительный анализ результатов показывает, что первая ММ не может быть использована для расчетов, так как максимальная погрешность составляет более 100%, что недопустимо.

Вычисленные значения момента M_d в точке центра плана эксперимента при использовании ММ (№2 и №3) дает недостаточную точность около 50%, следовательно, следует от них отказаться. Модель №4 удовлетворяет необходимой точности вычислений ($\approx 0,01\%$) и может быть использована в расчетах.

Для оценки адекватности принятой модели был построен график погрешностей в логарифмическом масштабе (рис. 3).

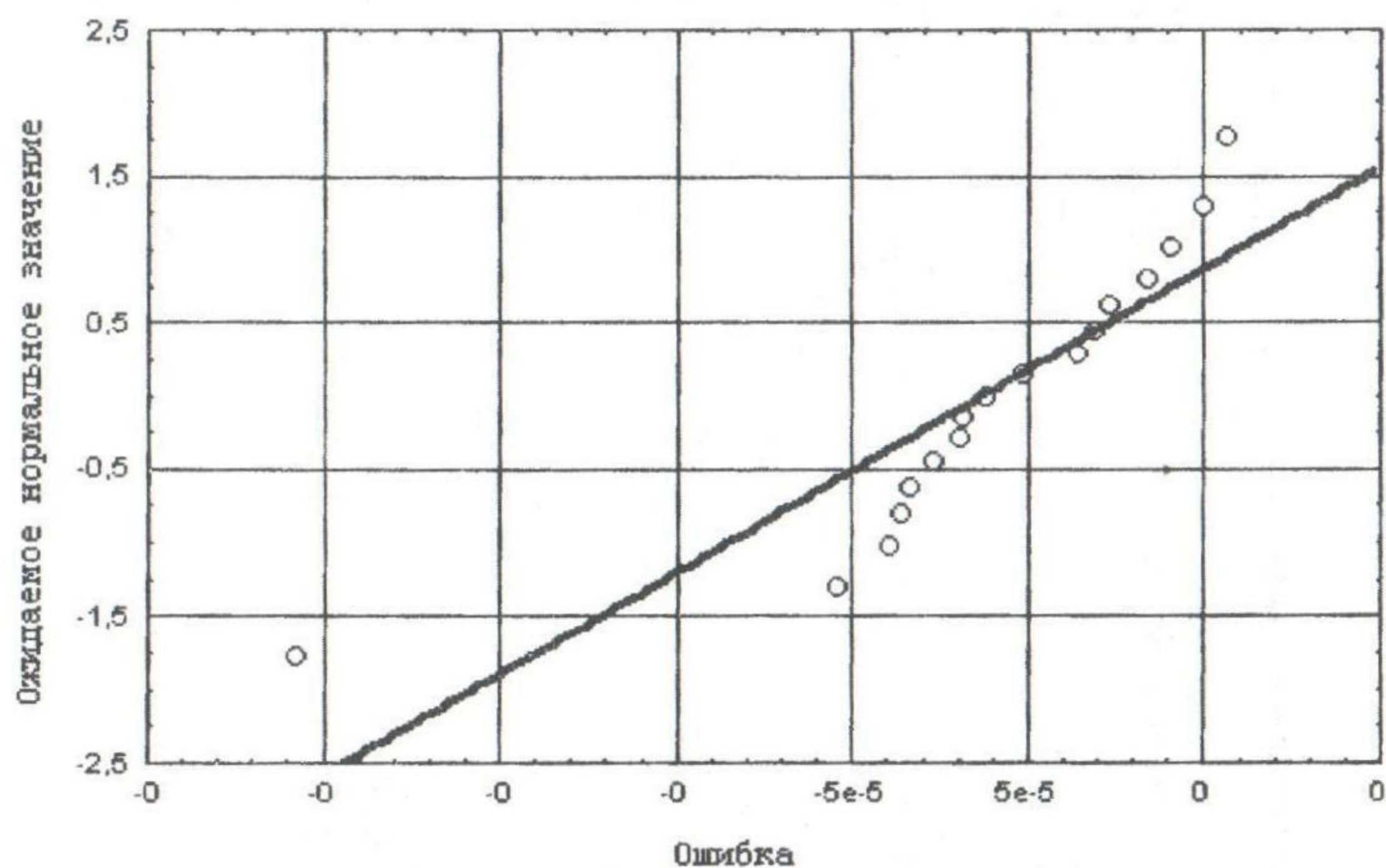


Рис.3. График погрешностей значений момента M_d , полученный при использовании ММ №4.

Вывод

Таким образом, предложенная математическая модель с достаточной для инженерных задач точностью описывает изменение величины M_d , в зависимости от скорости движения ПМ и её конструктивных особенностей, может быть рекомендована для использования в расчетах ходового дифферента ПМ.

Оценка точности вычисления значений гидродинамического момента Мд

Точное значение	№ оцениваемой математической модели (см. таб. 4)											
	Модель №1		Модель №2		Модель №3		Модель №4					
	Значение У _{мм}	Ошибка ΔУ	Значение У _{мм}	Ошибка ΔУ	Значение У _{мм}	Ошибка ΔУ	Значение У _{мм}	Ошибка ΔУ				
0	30,302	30,302	-10,3405	10,34052	1,056315	-1,05631	-0,00012	0,000119				
0	3,651983	-3,65198	6,754485	-6,75449	1,056315	-1,05631	2,83E-05	-2,8E-05				
-48,35	-54,528	6,178048	-41,5955	-6,75449	-47,2937	-1,05632	-48,35	4,71E-05				
-25	-59,9505	34,95049	-35,343	10,34301	-23,9434	-1,05656	-25,0002	0,000162				
0	19,68821	-19,6882	-4,64301	4,643015	1,056315	-1,05631	-7,9E-05	7,87E-05				
0	14,26577	-14,2658	12,45448	-12,4545	1,056315	-1,05631	2,17E-05	-2,2E-05				
-38,52	-43,9143	5,394263	-26,0655	-12,4545	-37,4637	-1,05632	-38,52	1,07E-05				
-57,63	-70,5643	12,93428	-62,2705	4,640515	-56,5737	-1,05633	-57,6301	0,000149				
0	-1,5393	1,5393	6,754485	-6,75449	1,056315	-1,05631	-1,2E-05	1,24E-05				
0	-28,1893	28,18931	-10,3405	10,34052	1,056315	-1,05631	-8,8E-05	8,82E-05				
-77,84	-86,3693	8,529346	-88,1805	10,34052	-76,7837	-1,05633	-77,8401	0,00013				
-122,88	-91,7918	-31,0882	-116,123	-6,75699	-121,824	-1,05634	-122,88	-1,8E-05				

Продолжение таблицы 5

№ оцениваемой математической модели (см. таб. 4)											
Точное значение	Модель №1		Модель №2		Модель №3		Модель №4		Значение	Ошибка	Ошибка
	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка			
Y	Y _{MM}	ΔY	Y _{MM}	ΔY	Y _{MM}	ΔY	Y _{MM}	ΔY	Y _{MM}	Y _{MM}	ΔY
-122,88	-91,7918	-31,0882	-116,123	-6,75699	-121,824	-1,05634	-122,88	-1,8E-05	-122,88	-122,88	-1,8E-05
0	-12,1531	12,15308	12,45448	-12,4545	1,056315	-1,05631	3,92E-06	-3,9E-06	3,92E-06	3,92E-06	-3,9E-06
0	-17,5755	17,57553	-4,64301	4,643015	1,056315	-1,05631	-2,5E-05	2,53E-05	-2,5E-05	-2,5E-05	2,53E-05
-68,01	-75,7556	7,74556	-72,653	4,643015	-66,9537	-1,05633	-68,0101	9,72E-05	-68,0101	-68,0101	9,72E-05
-155,5	-102,406	-53,0944	-143,048	-12,452	-154,444	-1,05634	-155,5	-5,8E-05	-155,5	-155,5	-5,8E-05
-19,15	-36,0518	16,90179	-36,0518	16,90176	-36,0518	16,90179	-19,1496	-0,00037	-19,1496	-19,1496	-0,00037