

МЕТОДИКА АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ВОДОИЗМЕЩЕНИИ СУДНА

Гарашенко М.А., аспирант ФГОУ ВО «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова»
Мельник П.В., аспирант ФГОУ ВО «Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова»

Предлагается методика адаптации параметров зоны навигационной безопасности путем идентификации значений аппроксимирующих коэффициентов тормозных путей и тактических диаметров циркуляции современных типов крупнотоннажных судов на основе данных о водоизмещении судна методом наименьших квадратов. Идентифицируются величины коэффициентов для принятых к исследованию судов. Производится оценка точности соответствующих параметров.

Ключевые слова: Зона навигационной безопасности, математическая модель, коэффициенты аппроксимации, метод наименьших квадратов.

METHODOLOGY OF ADAPTATION OF SHIP'S DOMAIN PARAMETERS ON BASIS OF INFORMATION ABOUT SHIP'S DISPLACEMENT

Garashchenko M., the post-graduate student, FSEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»
Melnik P., the post-graduate, FSEI HE «Admiral Ushakov Maritime State University»

The method of adaptation of ship's domain parameters by identifying values approximation coefficient of ship's stopping distance and tactical diameter of circulation for modern large-capacity vessels based on the method of least squares with cognizance information about ship's displacement is proposed. The values of the approximation coefficients for the vessels taken to the research are identified. The accuracy of the relevant parameters is estimated.

Keywords: ship's domain, mathematical model, approximation coefficients, the method of least squares.

Важнейшими критериями, влияющими на навигационное обеспечение безопасного плавания, являются маневренные и инерционные характеристики судна и совокупность динамических воздействий на его корпус и системы управления в процессе судовождения. Динамические возмущения провоцируются движением по заданной траектории, влиянием внутренних и внешних факторов, а также являются следствием степени загрузки судна. Данные работы [3] совместно с анализом таблиц маневренных элементов крупнотоннажных судов, основная информация о которых приведена в табл. 1, показали, что значительное воздействие на натуральные величины таких параметров, как тормозной путь и тактический диаметр циркуляции, оказывает водоизмещение судна, поскольку является одновременно:

- переменным параметром в процессе эксплуатации судна;
- силовой составляющей совокупности динамических воздействий на судно (весовой характеристикой);
- количественным критерием степени гидродинамического взаимодействия жидкости с корпусом судна.

С целью развития концепции зоны навигационной безопасности (ЗНБ), моделирующей идеализированное пространство вокруг судна [2], в настоящем исследовании предлагается методика адаптации параметров ЗНБ путем вывода эмпирических формул для определения тормозного пути и тактического диаметра циркуляции в зависимости от водоизмещения судна с учетом номинальной зоны конструктивной безопасности (ЗКБ) [1].

Таблица 1 – Основные данные исследуемых судов

№ п/п	Название судна	Год постройки	Длина судна L, м	Ширина судна B, м	Водоизмещение, т
1.	«FRISIAN SPRING»	2007	118, 14	13, 40	8279, 00
2.	«NS POWER»	2006	175, 97	31, 00	49387, 88
3.	«TAVRICHESKY BRIDGE»	2006	182, 32	32, 20	57064, 00
4.	«KUBAN»	2000	243, 00	42, 03	122842, 00
5.	«NS LOTUS»	2008	248, 96	43, 80	133324, 60
6.	«NIKOLAYZUYEV»	2012	249, 90	46, 00	141933, 7
7.	«SCF ALTAI»	2002	274, 48	48, 04	182617, 0
8.	«FRONT QUEEN»	2009	330, 00	60, 00	339100, 0

В соответствии со стандартами ИМО к маневренным качествам судна [4], тормозной путь и тактический диаметр циркуляции должны быть в пределах

$$S_T \leq 15L; \quad D_T \leq 5L, \tag{1}$$

где L – наибольшая (статическая) длина судна, м;

S_T – тормозной путь судна, м;

D_T – тактический диаметр циркуляции судна, м.

Исходя из этих требований, для принятых к исследованию судов (см. табл. 1) построена диаграмма зависимости предельно возможных значений тормозных путей и тактических диаметров циркуляции, определенных по длине судов в соответствии со стандартами ИМО (1), от водоизмещения (рис. 1) с целью визуализации характера изменения зависимости рассматриваемых параметров.

Как видно из рисунка, для описания изменения зависимости тормозного пути и тактического диаметра циркуляции от водоизмещения предпочтительнее воспользоваться степенными функциями, имеющими следующий вид:

$$S_T(D) = D^{k_1}; \quad 0 < k_1 < 1; \quad D_T(D) = D^{k_3}; \quad 0 < k_3 < 1, \tag{2}$$

где D – водоизмещение судна, т;

$k_{T, ix [1, 2, \dots, n]}$ – коэффициенты аппроксимации маневренных качеств судна, согласующие размерности переменных.

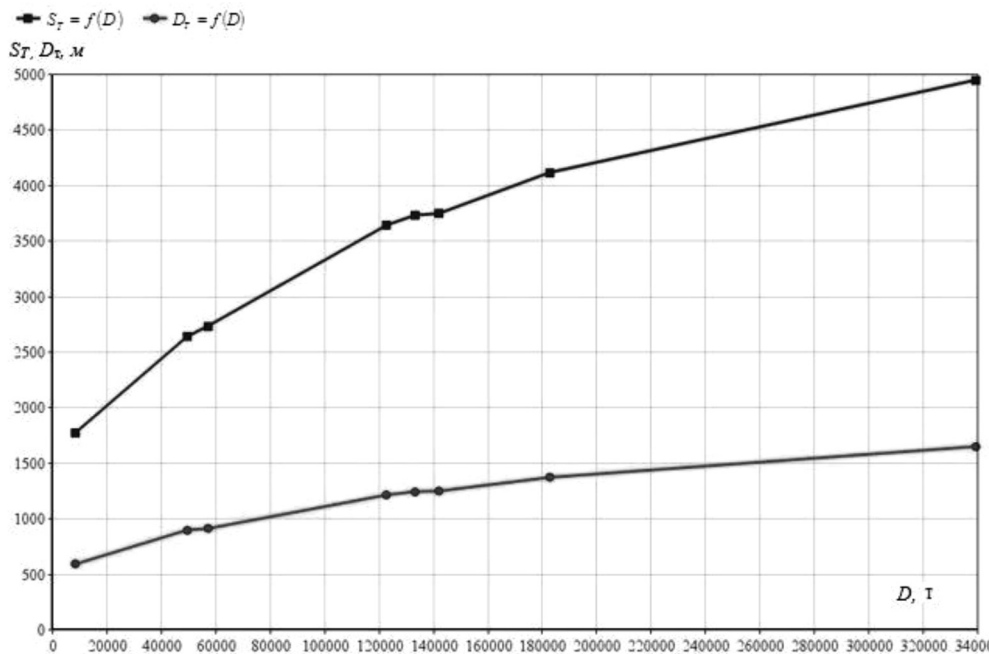


Рис. 1. Диаграмма зависимости тормозного пути и тактического диаметра циркуляции от водоизмещения судна в соответствии с требованиями IMO

Для проверки соответствия маневренных и инерционных характеристик исследуемых судов требованиям IMO на основе натуральных данных маневренных элементов построены диаграммы, приведенные на рис. 2 и 3, которые подтверждают целесообразность использования степенных функций для описания зависимостей рассматриваемых параметров.

В качестве дополнительного переменного элемента для идентификации параметров ЗНБ, как и в рассмотренных исследованиях, обобщенных в работе [2], используется скорость судна при разных режимах хода. Диаграмма зависимости скорости судна от тормозного пути, приведенная на рис. 4, показывает, что степенная функция является наиболее предпочтительной для описания соответствующей зависимости. Это подтверждается и анализом рассмотренных исследований:

$$S_T(V_0) = V_0^{k_2}, k_2 > 1, \tag{3}$$

где V_0 – исходная скорость движения судна, м/с.

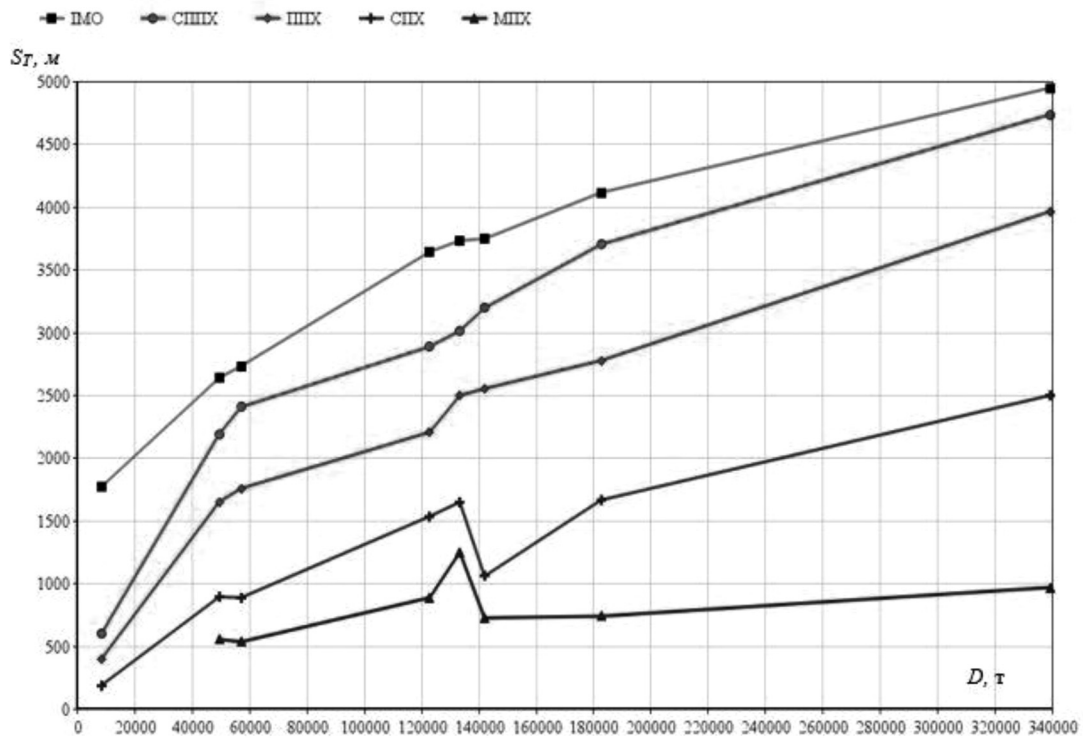


Рис. 2. Диаграмма зависимости тормозных путей от водоизмещения судна

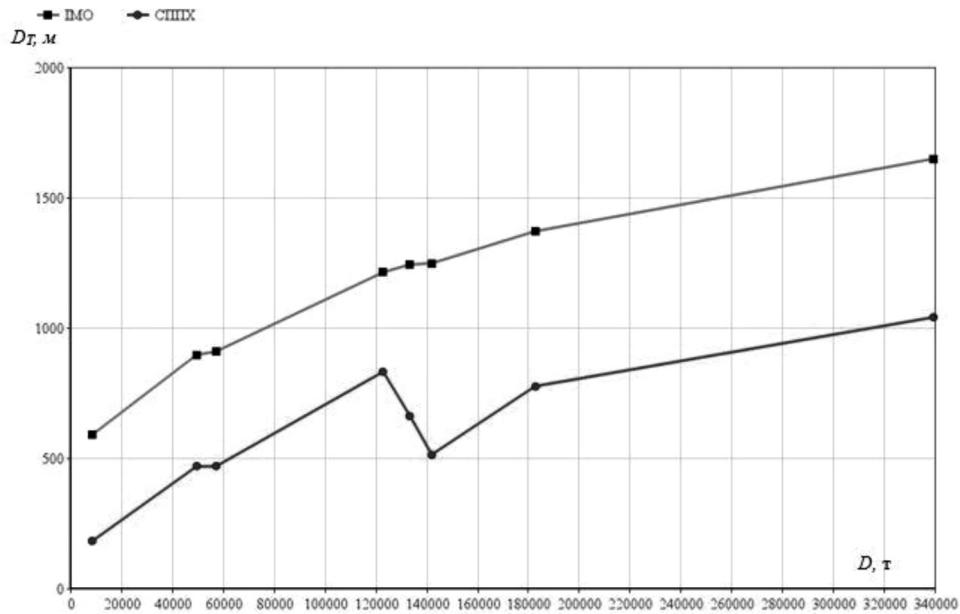


Рис. 3. Диаграмма зависимости тактического диаметра циркуляции от водоизмещения судна

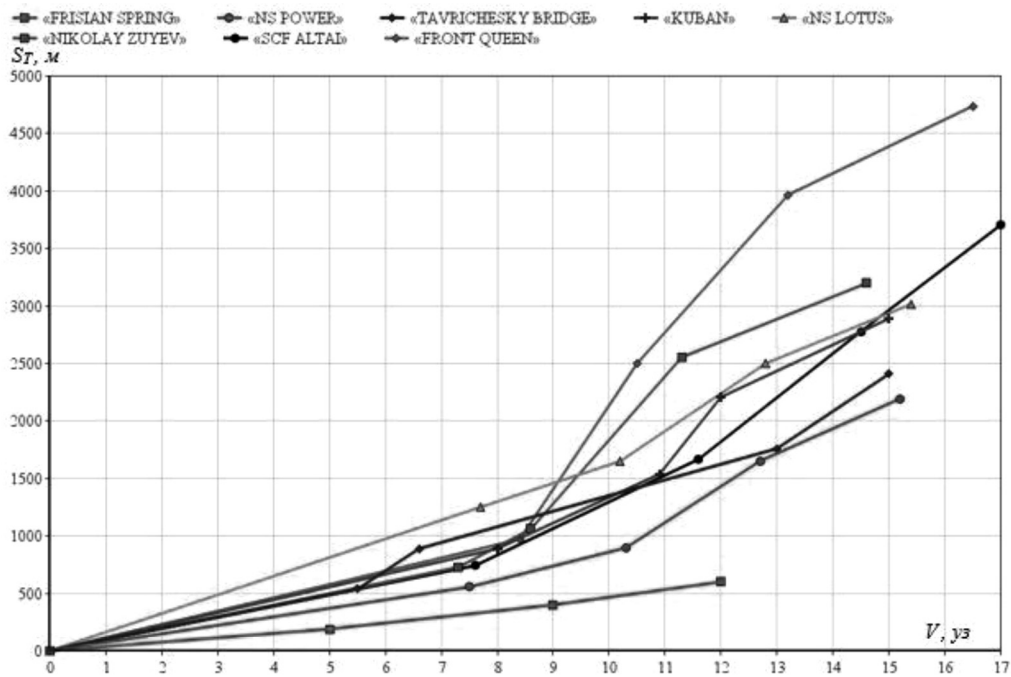


Рис. 4. Диаграмма зависимости тормозного пути от скорости

На основании вышеизложенных положений окончательные выражения для аппроксимации тормозного пути и тактического диаметра циркуляции судна в зависимости от водоизмещения и скорости целесообразно представить в следующем виде:

$$S_T = D^{k_1} \cdot V_0^{k_2}; \quad D_T = D^{k_3} \cdot V_0^{k_4} \tag{4}$$

При этом параметры модели ЗНБ с учетом анализа методов задания ее элементов [2] предлагается представить полуосьями эллипса, определяемыми тормозными путями и тактическими диаметрами циркуляции, которые с учетом исходной ЗКБ будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} a = a_k + S_T = a_k + D^{k_1} \cdot V_0^{k_2}; & S_T = D^{k_1} \cdot V_0^{k_2} \leq 15L; \\ b = b_k + D_T = b_k + D^{k_3} \cdot V_0^{k_4}; & D_T = D^{k_3} \cdot V_0^{k_4} \leq 5L, \end{cases} \tag{5}$$

где a, b – оси эллипса, определяющие параметры ЗНБ (длина и ширина), м;
 a_k, b_k – исходные параметры ЗКБ (длина и ширина), м;
 k_i – коэффициенты аппроксимации маневренных качеств судна, согласующие размерности переменных.

Для идентификации коэффициентов аппроксимации в выражениях (4) методом наименьших квадратов (МНК) производится их линеаризация логарифмированием:

$$\ln S_T = k_1 \ln D + k_2 \ln V_0; \quad \ln D_T = k_3 \ln D + k_4 \ln V_0 \quad (6)$$

Суммы квадратов погрешностей аппроксимации функциями (4) натуральных значений тормозных путей и тактических диаметров циркуляций примут вид:

$$Q_1(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{S_i}^2 = \sum_{i=1}^n [(k_1 \ln D_i + k_2 \ln V_{0i}) - \ln S_{Ti}]^2 \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$Q_2(k_3, k_4) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{D_i}^2 = \sum_{i=1}^n [(k_3 \ln D_i + k_4 \ln V_{0i}) - \ln D_{Ti}]^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

где n – количество наблюдений (тормозных путей, тактических диаметров циркуляции при разных режимах движения);

Q_1, Q_2 – суммы квадратов погрешностей аппроксимации функциями (4) натуральных значений;

$\varepsilon_{S_i}, \varepsilon_{D_i}$ – погрешности аппроксимации функциями (4) натуральных значений.

После применения МНК, по условиям минимума суммы квадратов погрешностей аппроксимации (6)

$$\frac{\partial Q_1}{\partial k_1} = 0; \quad \frac{\partial Q_1}{\partial k_2} = 0; \quad \frac{\partial Q_2}{\partial k_3} = 0; \quad \frac{\partial Q_2}{\partial k_4} = 0 \quad (9)$$

получаются системы нормальных уравнений для определения искомых коэффициентов аппроксимации:

$$\begin{cases} k_1 \sum_{i=1}^n \ln^2 D_i + k_2 \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i = \sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln D_i; \\ k_1 \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i + k_2 \sum_{i=1}^n \ln^2 V_{0i} = \sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln V_{0i}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} k_3 \sum_{i=1}^n \ln^2 D_i + k_4 \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i = \sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln D_i; \\ k_3 \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i + k_4 \sum_{i=1}^n \ln^2 V_{0i} = \sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln V_{0i}. \end{cases} \quad (11)$$

Решение систем нормальных уравнений по правилу Крамера дает выражения для определения значений искомых коэффициентов аппроксимации по сериям натуральных данных тормозных путей и тактических диаметров циркуляции судов:

$$\begin{cases} k_1 = \left(\sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln D_i \sum_{i=1}^n \ln^2 V_{0i} - \sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln V_{0i} \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \right) / \Delta; \\ k_2 = \left(\sum_{i=1}^n \ln^2 D_i \sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln V_{0i} - \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \sum_{i=1}^n \ln S_{Ti} \ln D_i \right) / \Delta; \\ k_3 = \left(\sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln D_i \sum_{i=1}^n \ln^2 V_{0i} - \sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln V_{0i} \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \right) / \Delta; \\ k_4 = \left(\sum_{i=1}^n \ln^2 D_i \sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln V_{0i} - \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \sum_{i=1}^n \ln D_{Ti} \ln D_i \right) / \Delta; \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \ln^2 D_i \sum_{i=1}^n \ln^2 V_{0i} - \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \sum_{i=1}^n \ln V_{0i} \ln D_i \quad (13)$$

где Δ – главный определитель системы.

В табл. 2 приведены результаты идентификации коэффициентов аппроксимации для крупнотоннажных судов (см. табл. 1) по выражениям (12), (13) в среде MicrosoftExcel в грузу, в балласте и обобщенные средними квадратическими отклонениями (СКО) от натуральных табличных.

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимации

Судно	Состояние загрузки судна	Значения коэффициентов					
		k_1	k_2	$СКО S_{T.M}$	k_3	k_4	$СКО D_{T.M}$
«FRISIAN SPRING»	В грузу	0,444	1,307	7,194	–	–	–
	В балласте	0,485	1,409	1,495	–	–	–
	Обобщенные	0,406	1,662	109,901	–	–	–
«NS POWER»	В грузу	0,329	2,012	95,326	–	–	–
	В балласте	0,326	2,075	37,267	–	–	–
	Обобщенные	0,316	2,110	80,729	–	–	–

Судно	Состояние загрузки судна	Значения коэффициентов					
		k_1	k_2	$CKO S_{г, м}$	k_3	k_4	$CKO D_{г, м}$
«TAVRICHESKY BRIDGE»	В грузу	0,456	1,344	129,327	–	–	–
	В балласте	0,566	1,104	443,486	–	–	–
	Обобщенные	0,463	1,483	617,275	–	–	–
«KUBAN»	В грузу	0,347	1,930	168,678	–	–	–
	В балласте	0,380	1,699	98,471	–	–	–
	Обобщенные	0,375	1,735	143,360	–	–	–
«NS LOTUS»	В грузу	0,448	1,321	97,973	–	–	–
	В балласте	0,453	1,701	18,574	–	–	–
	Обобщенные	0,328	2,240	838,056	–	–	–
«NIKOLAYZUYEV»	В грузу	0,308	2,252	388,971	–	–	–
	В балласте	0,409	1,977	209,977	–	–	–
	Обобщенные	0,255	2,737	800,037	–	–	–
«SCF ALTAI»	В грузу	0,317	2,018	59,789	–	–	–
	В балласте	0,315	2,140	87,597	–	–	–
	Обобщенные	0,288	2,244	244,463	–	–	–
«FRONT QUEEN»	В грузу	0,290	2,315	711,893	–	–	–
	В балласте	0,306	2,369	564,720	–	–	–
	Обобщенные	0,253	2,618	893,278	–	–	–
Общие значения для исследуемых судов	В грузу	<i>0,387</i>	<i>1,676</i>	<i>294,110</i>	<i>0,470</i>	<i>0,483</i>	<i>106,391</i>
	В балласте	<i>0,449</i>	<i>1,575</i>	<i>474,898</i>	<i>0,641</i>	<i>0,134</i>	<i>109,149</i>
	Обобщенные	0,365	1,875	541,757	0,301	1,586	245,648

Для проверки достоверности результатов идентификации произведен расчет значений тормозных путей и тактических диаметров циркуляции судна по выражениям (4) для сравнения с величинами, лимитированными согласно требованиям ИМО, и соответствующими табличными данными (рис. 5 и 6).

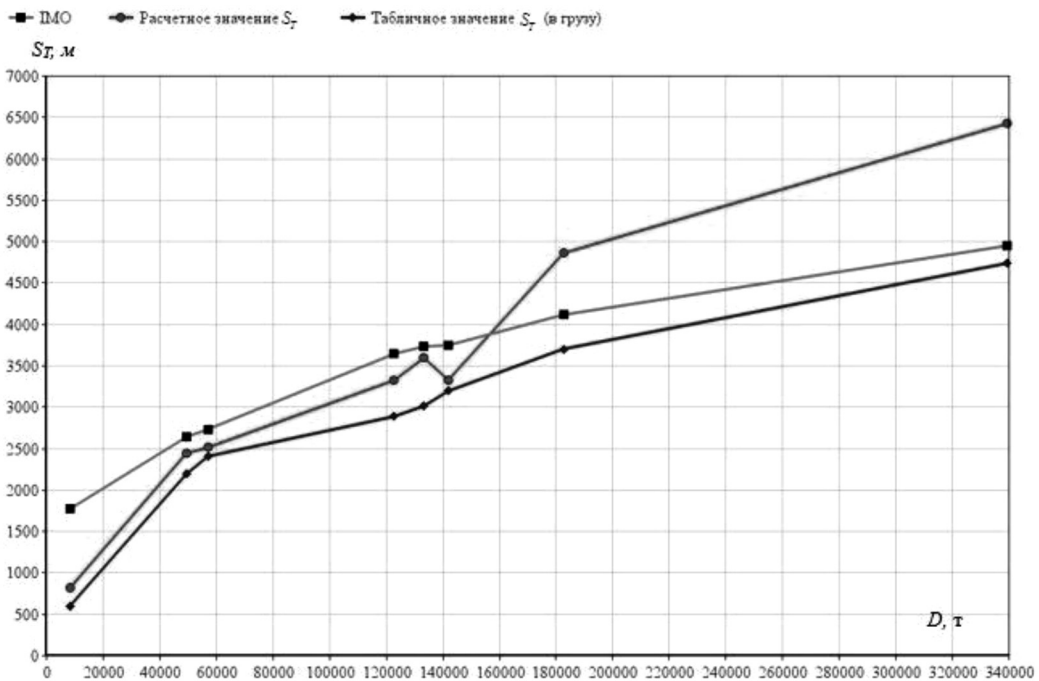


Рис. 5. Сравнение аппроксимированных значений тормозных путей с натурными данными и лимитированными значениями

Как видно из рис. 5, для судов водоизмещением более чем 150 000 тонн значения тормозных путей при использовании идентифицированных значений коэффициентов резко возрастают и в итоге значительно превышают величины, являющиеся предельными в соответствии с требованиями ИМО. Поэтому, для крупнотоннажных судов водоизмещением более 150 000 тонн была произведена дополнительная идентификация коэффициентов с целью уточнения итоговых параметров. Результирующие значения коэффициентов аппроксимации приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Итоговые уточненные значения аппроксимированных коэффициентов

Водоизмещение судна	Значения коэффициентов			
	k_1	k_2	k_3	k_4
1	3	4	5	6
$D < 150\,000 т$	0,365	1,875	0,301	1,586
$D > 150\,000 т$	0,317	2,018		

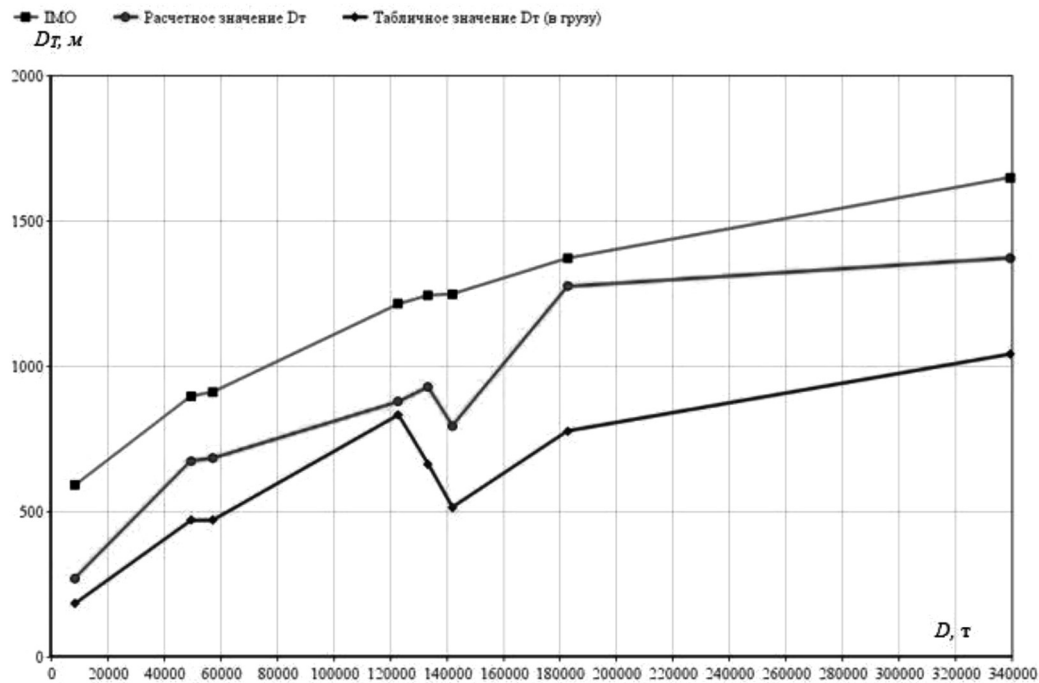


Рис. 6. Сравнение аппроксимированных значений тактических диаметров циркуляции с натурными данными и лимитированными значениями

На рис. 7 представлен исправленный график расчетных величин тормозных путей с учетом дополнительной идентификации значений коэффициентов аппроксимации для крупнотоннажных судов.

Таким образом, принимая к учету исходную математическую модель ЗНБ (5), начальные параметры которой лимитируются ЗКБсудна, по результатам проведенных исследований предлагаются окончательные выражения параметров ЗНБ на основе данных о водоизмещении судна, имеющие следующий вид:

$$\begin{cases} a = a_k + \begin{cases} D^{0,365} \cdot V_0^{1,875}; & D < 150\,000 \text{ м}; \\ D^{0,317} \cdot V_0^{2,018}; & D > 150\,000 \text{ м}; \end{cases} \\ b = b_k + D^{0,301} \cdot V_0^{1,586}. \end{cases} \quad (14)$$

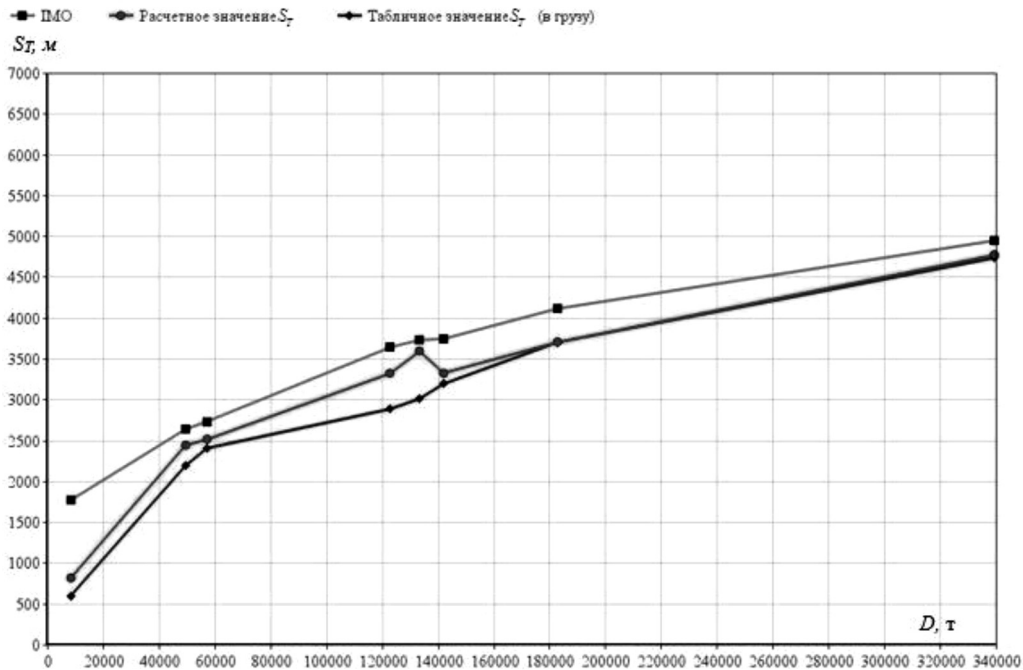


Рис. 7. Сравнение аппроксимированных уточненных значений тормозных путей с натурными данными и лимитированными значениями

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Значения тормозных путей и тактических диаметров циркуляции судна, определенные на основании предложенных аппроксимаций (14), наиболее точно соответствуют вероятнейшим (табличным) значениям соответствующих величин для крупнотоннажных судов;
2. По значениям СКО более точные значения аппроксимированных тормозных путей по идентифицированным коэффициентам получаются в зависимости от состояния загрузки для отдельных судов. Менее точные – при использовании коэффициентов аппроксимации,

идентифицированных для обобщенных состояний загрузки судов, что объясняется отсутствием натуральных данных для промежуточных загрузок судов;

3. Ввиду отсутствия необходимых натуральных данных выведена общая величина СКО тактических диаметров циркуляции для исследуемых судов;

4. Значения СКО являются значительными при аппроксимации тормозных путей и тактических диаметров циркуляции некоторых судов (см. табл. 2), что возможно обуславливается влиянием следующих факторов:

- наличие грубых погрешностей при определении значений маневренных элементов судов;
- необходимость учета большего количества переменных, натуральных и статистических данных, а также динамических характеристик движения крупнотоннажных судов в качестве слагаемых элементов обобщенной системы «судно – ЗНБ»;

5. Согласно стандартам ИМО [4], требования к маневренным элементам судна (1) должны выполняться при условии, что:

$$\left(\frac{D}{N_s} \right) \cdot V_0 \cdot F_r^2 < 1;$$

$$F_r^2 = \frac{V_0}{\sqrt{gL}},$$
(15)

где N_s – максимальная длительная мощность СЭУ, л. с. ;

F_r – число Фруда при скорости на испытаниях;

g – ускорение свободного падения, м/с².

В качестве дальнейшего перспективного направления адаптации ЗНБ к существующей ситуации с целью идеализации безопасного пространства вокруг судна является обработка и анализ соответствующих элементов крупнотоннажных судов[5].

Литература:

1. Васьков, А. С. Взаимосвязь зон навигационной безопасности судна [Текст]/ А. С. Васьков, В. А. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова. -2013. - №2(3). - С. 18 – 21.
2. Гарашенко, М. А. Способы представления зоны навигационной безопасности судна. [Текст]/ А. С. Васьков, М. А. Гарашенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – Вып. 3 (84).
3. Исанин, Н. Н. Морской энциклопедический справочник [Текст]. В 2 т. Т. 2. О – Я. – Ленинград: Изд. «Судостроение», 1987. – 520 с.
4. Standards for Ship Manoeuvrability/ IMO Resolution MSC. 137(76), adopted on 4 December 2002.
5. Бурханов М.В., Ермолаев Г.Г. и др. Справочник капитана дальнего плавания. //Справочник под редакцией Ермолаева. – М: Транспорт, 1988 – 248 с.