

УДК 629.5 Е30

В.А. Нильва

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО СУХОГРУЗНОГО СУДНА
СМЕШАННОГО И ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

В работе изложен аналитический метод определения геометрических характеристик поперечного сечения поврежденного корпуса сухогрузного судна смешанного плавания, обоснована возможность его применения для судов смешанного и внутреннего плавания.

Ключевые слова: сухогрузное судно смешанного река-море плавания, геометрические характеристики поперечного сечения, аналитический метод, модель повреждения.

В роботі викладено аналітичний метод визначення геометричних характеристик поперекового перетину пошкодженого корпусу суховантажного судна змішаного плавання, обґрунтована можливість його застосування для суден змішаного та внутрішнього плавання.

Ключові слова: суховантажне судно змішаного плавання, геометричні характеристики поперекового перетину, аналітичний метод, модель пошкодження.

Analytic method of transverse section geometric characteristics definition for damaged dry-cargo vessel is considered in the following report, and possibility of its usage for river-sea going vessels' calculation is proved.

Keywords: dry-cargo river-sea going vessel, transverse section geometric characteristics, analytic method, damage model.

Постановка задачи. Для судна, получившего повреждение корпуса, необходимо оценить аварийную прочность. Для такой оценки общей продольной прочности из схемы эквивалентного бруса исключается группа продольных связей, размеры и локализация которой зависит от характера повреждений. В публикациях [1-2] рассматривался упрощенный метод учета потери части продольных связей при повреждении судна смешанного и внутреннего плавания. Сам метод был разработан для морских судов в рамках комплексного подхода к оценке живучести поврежденного судна, предложенный Г.В. Егоровым [3-8].

Методика подразумевала определение геометрических характеристик неповрежденного судна, поврежденного судна и непосредственно самого повреждения с помощью программного комплекса ЭльБрус МИБ. Использование такого подхода объясняется тем, что аналитические методы давали большую погрешность из-за значительных размеров повреждений, принятых для морских судов.

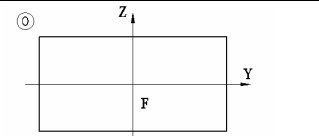
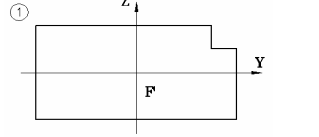
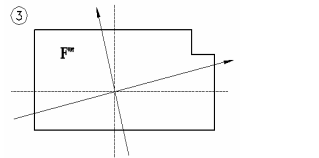
Целью статьи является рассмотрение аналитического метода определения геометрических характеристик поврежденного сухогрузного судна и обоснование возможности его применения для судов аналогичного типа смешанного и внутреннего плавания.

Изложение основного материала. Определим геометрические характеристики для произвольного тела, из которого изъяли часть площади. Известна площадь изъятой части и координаты ее центра тяжести. Задача: определить положение центра тяжести и центральных осей поврежденной фигуры.

Стадии процесса определения геометрических характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1

Стадии процесса определения геометрических характеристик

Стадия	Состояние объекта	Описание
«0»		Исходное состояние объекта, его площадь обозначим F
«1*»		Изъятие площади ΔF . Координатные оси неизменны
«1»		Объект с изъятой площадью ΔF в прежних координатных осях, площадь объекта обозначим F'
«2»		Объект с изъятой площадью в новых координатных осях, перенесенных в точку O'' , площадь объекта обозначим F''
«3»		Объект с изъятой площадью в новых координатных осях, повернутых на угол α , площадь объекта обозначим F'''

Стадия «0». Пусть существует произвольная фигура, расположенная в координатных осях Oy (горизонтальная) и Oz (вертикальная). Центр тяжести фигуры расположен в точке O . Статические моменты относительно осей Oy и Oz равны нулю.

Стадия «1». Новая фигура имеет площадь F' , $F' = F - \Delta F$. Для нее можем посчитать статические моменты относительно осей Oy и Oz соответственно $S'_y = S_y - S_y^\Delta$, $S'_z = S_z - S_z^\Delta$,

где $S_y = S_z = 0$;

S_y^Δ, S_z^Δ – статический момент повреждения в терминах исходных координатных осей. Поскольку $S'_y \neq 0$, $S'_z \neq 0$, то центр тяжести поврежденной фигуры сместился относительно точки O .

Стадия «2». При переносе осей в точку $O''(\Delta y; \Delta z)$ – центр тяжести новой «поврежденной» фигуры – фактически происходит замена переменных

$$\left[\begin{array}{l} z'' = z - \Delta z; y'' = y - \Delta y \\ F' \rightarrow F'', dF' \rightarrow dF'', J = 1 \end{array} \right]$$

При этом

$$\begin{aligned} S''_y = 0 &\Leftrightarrow \iint_{F''} z'' dF'' = 0 \Leftrightarrow \text{Обратная замена переменных} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \left[\begin{array}{l} z = z'' + \Delta z; y = y'' + \Delta y \\ F'' \rightarrow F', dF'' \rightarrow dF', J = 1 \end{array} \right] \Leftrightarrow \iint_{F'} (z - \Delta z) dF' = 0 \end{aligned}$$

Приходим к выражению $\iint_{F'} z dF' = \Delta z \iint_{F'} dF'$, где интеграл $\iint_{F'} z dF'$ – это статические моменты относительно оси Oy – S'_y , а интеграл $\iint_{F'} dF'$ – площадь фигуры «1» – F' . Путем прямых вычислений получим

$$S_y - S_y^\Delta = \Delta z (F - \Delta F) \Rightarrow \Delta z = \frac{0 - S_y^\Delta}{F - \Delta F} = \frac{-Z_D \Delta F}{F - \Delta F}.$$

Аналогичным образом находим выражение для Δy .

$$\Delta y = \frac{-Y_D \Delta F}{F - \Delta F}.$$

Используя выражения для статических моментов, были получены зависимости для определения смещения центра тяжести поврежденной фигуры в первоначальной системе координат.

Для того, чтобы в итоге рассуждений вычислить геометрические характеристики поврежденной фигуры и привести соответствующие формулы, необходимо провести ряд промежуточных вычислений, которые заключаются в нахождении на каждом этапе рассуждений моментов инерции поврежденной фигуры.

Начнем с исходных показателей.

Для стадии «1» справедливо равенство $I'_y = I_y^{исх} - I_y^{новр}$,

где I'_y – момент инерции новой фигуры в терминах исходных осей

$I_y^{исх}$ – момент инерции исходной фигуры

$I_y^{новр}$ – момент инерции изъятой площади в терминах исходных осей

$$\iint_{F'} z^2 dF' = \iint_F z^2 dF - \iint_{\Delta F} z^2 d\Delta F.$$

Рассмотрим стадию «1*» для вычисления $I_y^{новр}$.

Собственные оси поврежденной площади ΔF обозначим $O^* z^*$, $O^* y^*$, ее центр тяжести находится в точке $O^*(Y_D, Z_D)$. Воспользуемся заменой переменных, перейдя в собственную систему координат повреждения.

$$\begin{aligned} I_y^{новр} &= \iint_{\Delta F} z^2 d\Delta F = \left[\begin{array}{l} z^* = z - Z_D; y^* = y - Y_D \\ z^2 = (z^*)^2 + 2Z_D z^* + Z_D^2 \\ J = 1 \end{array} \right] = \\ &= \iint_{\Delta F^*} (z^*)^2 d\Delta F^* + 2Z_D \iint_{\Delta F^*} z^* d\Delta F^* + Z_D^2 \iint_{\Delta F^*} d\Delta F^* = \\ &= i_{cob.} + S_y^* + Z_D^2 \Delta F = i_{cob.} + 0 + Z_D^2 \Delta F. \end{aligned}$$

Возвращаясь к выражению для I'_y получим

$$I'_y = I_y - i_y^{cob} - Z_D^2 \Delta F.$$

Аналогично получим выражение для $I'_z = I_z - i_z^{cob} - Y_D^2 \Delta F$.

Таким образом, найдены моменты поврежденной фигуры в терминах исходных осей.

Для стадии «2» оси перенесены параллельно в центр тяжести поврежденной фигуры, найденный ранее. Относительно исходного центра тяжести он перемещен на величины Δz и Δy соответственно. Момент инерции поврежденной фигуры в терминах новой системы координат

$$I''_y = \iint_{F''} z''^2 dF''.$$

Сделаем обратную замену переменных, получим

$$\begin{aligned}
 I_y^{II} &= \iint_{F^{II}} z^{II/2} dF^{II} = \left[\begin{array}{l} z = z^{II} + \Delta z; y = y^{II} + \Delta y \\ F^{II} \rightarrow F^I \\ z^{II/2} = z^2 - 2\Delta z \cdot z + \Delta z^2; J = 1 \end{array} \right] = \\
 &= \iint_{F^I} (z^2 - 2\Delta z \cdot z + \Delta z^2) dF^I = \iint_{F^I} z^2 dF^I - 2\Delta z \iint_{F^I} z dF^I + \Delta z^2 \iint_{F^I} dF^I = \\
 &= I_y^I - 2\Delta z \cdot S_y^I + \Delta z^2 (F - \Delta F) = \\
 &= I_y^I - 2\Delta z \cdot \Delta z (F - \Delta F) + \Delta z^2 (F - \Delta F) = I_y^I - \Delta z^2 (F - \Delta F).
 \end{aligned}$$

Аналогично получим выражение для $I_z^{II} = I_z^I - \Delta y^2 (F - \Delta F)$.

Перейдем к стадии «3». Координатные оси повернули на угол $\alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$. Допустим, что новые оси координат – главные централь-

ные оси для поврежденной фигуры. Тогда $I_{yz}^{III} = 0$ в терминах этих осей.

Выразим $I_{yz}^{III} = 0$ через уже известные нам величины. Для этого нужно будет вернуться в оси координат стадии «2», и повернуть систему координат на угол $\beta = -\alpha$.

Снова прибегнув к замене координат, получим

$$\begin{aligned}
 I_{yz}^{III} &= \iint_{F^{III}} z^{III} y^{III} dF^{III} = \\
 &= \left[\begin{array}{l} \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} y^{III} \\ z^{III} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y^{II} \\ z^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y^{II} \\ z^{II} \end{pmatrix}; \\ J = 1; y^{III} \cdot z^{III} = -\frac{1}{2} \sin 2\alpha (y^{II2} - z^{II2}) + \cos 2\alpha y^{II} z^{II}; \end{array} \right] = \\
 &= \iint_{F^{II}} \left(-\frac{1}{2} \sin 2\alpha \cdot y^{II2} \right) dF^{II} + \iint_{F^{II}} \left(\frac{1}{2} \sin 2\alpha \cdot z^{II2} \right) dF^{II} + \\
 &+ \iint_{F^{II}} \cos 2\alpha y^{II} z^{II} dF^{II} = -\frac{1}{2} I_z^{II} \sin 2\alpha + \frac{1}{2} I_y^{II} \sin 2\alpha + \cos 2\alpha I_{yz}^{II}; \\
 I_{yz}^{III} &= \frac{1}{2} \sin 2\alpha (I_y^{II} - I_z^{II}) + \cos 2\alpha I_{yz}^{II}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{yz}''' = 0 &\Leftrightarrow \frac{1}{2} \sin 2\alpha (I_y'' - I_z'') + \cos 2\alpha I_{yz}'' = 0 \Leftrightarrow \sin 2\alpha (I_y'' - I_z'') = \\
 &= -2 \cos 2\alpha I_{yz}'' \Leftrightarrow \frac{\sin 2\alpha}{\cos 2\alpha} = -\frac{2 I_{yz}''}{I_y'' - I_z''} = \frac{2 I_{yz}''}{I_z'' - I_y''}; \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow \alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 I_{yz}''}{I_z'' - I_y''}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, найден угол поворота центральных осей.

Зная угол поворота главных центральных осей, найдем главные моменты инерции поврежденной фигуры

$$\begin{aligned}
 I_{yz}''' &= I_{yz}'' = I_y'' \cos^2 \alpha + I_z'' \sin^2 \alpha - I_{yz}'' \sin 2\alpha \\
 I_{zz}''' &= I_{zz}'' = I_z'' \cos^2 \alpha + I_y'' \sin^2 \alpha + I_{yz}'' \sin 2\alpha.
 \end{aligned}$$

Подставив соответствующие значения для I_y'', I_z'', I_{yz}'' , получим

$$\begin{aligned}
 I_{yz}''' &= [I_y - i_y^{cob} - Z_D^2 \Delta F - \Delta z^2 (F - \Delta F)] \cos^2 \alpha + \\
 &+ [I_z - i_z^{cob} - Y_D^2 \Delta F - \Delta y^2 (F - \Delta F)] \sin^2 \alpha - \\
 &- [0 - i_{yz}^{cob} - Z_D Y_D \Delta F - \Delta z \cdot \Delta y (F - \Delta F)] \sin 2\alpha; \\
 I_{zz}''' &= [I_z - i_z^{cob} - Y_D^2 \Delta F - \Delta y^2 (F - \Delta F)] \cos^2 \alpha + \\
 &+ [I_y - i_y^{cob} - Z_D^2 \Delta F - \Delta z^2 (F - \Delta F)] \sin^2 \alpha + \\
 &+ [0 - i_{yz}^{cob} - Z_D Y_D \Delta F - \Delta z \cdot \Delta y (F - \Delta F)] \sin 2\alpha.
 \end{aligned}$$

В результате мы определили положение главных центральных осей поврежденной фигуры, а также выражения для основных геометрических характеристик.

При анализе поврежденного состояния судна внутреннего или смешанного плавания его геометрические характеристики можно определить аналитическим путем, рассмотренным выше (конечные результаты метода совпадают с результатами, изложенными в [1]). Вывод о состоянии поврежденного судна можно сделать по тому, насколько повреждение ослабило поперечное сечение корпуса и, соответственно, во сколько раз в этом сечении возросли нормальные напряжения от продольного изгиба в крайних связях корпуса.

Необходимые для этого исходные данные приведены ниже.

Площадь поперечного сечения неповрежденного судна F , его моменты инерции I_y, I_z , площадь повреждения ΔF , собственные моменты инерции повреждения i_y^{cob}, i_z^{cob} , координаты центра тяжести поврежде-

ния Z_D, Y_D . Перечисленные параметры определяются с помощью программного комплекса ЭльБрус.

Полученные значения главных центральных моментов инерции подставляем в выражение

$$K_{\Delta} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \frac{Z_A}{Z_{A1}} \frac{I_y}{I_{y2}} \beta,$$

где $\beta = \cos \alpha \left(1 + \frac{Y_A}{Z_A} \frac{I_{y2}}{I_{z2}} \operatorname{tg} \alpha \right)$ [3].

K_{Δ} – коэффициент, показывающий, во сколько максимальные нормальные напряжения σ_{max} , возникающие в конструкциях поврежденного судна, больше, чем исходные σ_0 .

Y_A, Z_A, m – координаты наиболее удаленной точки (поврежденное судно), определяются графически.

Y_{A1}, Z_{A1}, m – координаты наиболее удаленной точки (исходное судно).

Сравнение геометрических характеристик, в частности главных моментов инерции, полученных аналитическим путем с выходными данными программного комплекса ЭльБрус представлено в таблице 2. При этом не для всех моделей повреждения необходимо задавать собственный момент инерции поврежденной (исключаемой) конструкции. Прочерк в таблице означает не отсутствие данной характеристики у конструкции, а возможность не учитывать ее для определения главных моментов инерции поврежденного судна.

В качестве объекта исследования было выбрано суда проекта RSD44 [1] и 507Б.

Геометрические характеристики поперечных сечений поврежденного судна, в частности его главные моменты инерции, полученные аналитическим путем, сравниваются с выходными данными программного комплекса ЭльБрус МИБ. При этом расхождение конечных результатов составляет менее 1 %.

Полученные результаты подтверждают возможность использования аналитического метода определения геометрических характеристик поврежденного судна.

Обозначения, принятые в таблице:

1. Столкновение, глубина 0,9 м;
2. Столкновение, глубина $B/5$;
3. Столкновение, глубина 0,59 м;
4. Посадка на камень в районе ДП, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м;
5. Посадка на камень в районе ДП, глубина $B/15$, ширина $B/6$;
6. Посадка на камень в районе ДП, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м;

7. Посадка на камень в районе скулы, глубина 0,8 м, ширина 1,65 м;
8. Посадка на камень в районе скулы, глубина $B/15$, ширина $B/6$;
9. Посадка на камень в районе скулы, глубина 0,49 м, ширина 3,0 м;
10. Посадка на мель, глубина $B/15$.
11. Трещина в комингсе.

Выводы. Рассмотренный аналитический метод используется для учета потери части продольных связей при повреждении сухогрузного судна смешанного и внутреннего плавания, что подробно было изложено в [1]. Сам метод был разработан Г.В. Егоровым [3], но в условиях задачи комплексного подхода к оценке живучести поврежденного морского судна не использовался из-за большой погрешности.

Проведенный анализ доказал возможность использования такого аналитического подхода для определения геометрических характеристик поврежденного корпуса судов смешанного и внутреннего плавания. Для ряда повреждений (посадка на камень в районе ДП, в районе скулы) нет необходимости задавать в исходных данных собственные моменты инерции повреждения.

Таблица 2

Сравнение геометрических характеристик

Номер	Собственные моменты инерции			Расчетный метод		ЭльБрус		Погрешность	
	$i_{y_2}, \text{м}^4$	$i_{z_2}, \text{м}^4$	$i_{yz_2}, \text{м}^4$	$I_{y_2}, \text{м}^4$	$I_{z_2}, \text{м}^4$	$I_{y_2}, \text{м}^4$	$I_{z_2}, \text{м}^4$	$\delta_{y_2}, \%$	$\delta_{z_2}, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RSD 44, мидель									
1	0,224	–	–	4,818	23,211	4,818	23,210	0,01	0,00
2	1,669	0,184	0,037	1,757	9,642	1,758	9,642	-0,04	0,00
3	0,185	–	–	4,857	23,638	4,857	23,640	0,00	-0,01
4	–	–	–	4,857	28,625	4,855	28,620	0,04	0,02
5	–	–	–	4,652	28,509	4,637	28,460	0,31	0,17
6	–	–	–	4,771	28,572	4,770	28,540	0,03	0,11
7	–	–	–	4,861	27,105	4,859	27,100	0,03	0,02
8	–	–	–	4,677	25,698	4,666	25,660	0,24	0,15
9	–	–	–	4,769	26,911	4,769	26,890	0,01	0,08
10	0,080	8,236	0,000	1,313	20,404	1,311	20,410	0,12	-0,03
11	0,038	0,003	0,006	3,276	24,461	3,273	24,470	0,08	-0,04

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RSD 44,38 шп.,									
1	0,218	–	–	1,908	14,351	1,908	14,350	0,00	0,00
2	0,640	0,166	-0,017	0,985	7,339	0,986	7,346	-0,07	-0,09
3	0,178	–	–	1,960	14,830	1,960	14,830	-0,02	0,00
4	–	–	–	2,113	19,930	2,112	19,930	0,06	0,00
5	–	–	–	2,016	19,809	2,003	19,760	0,66	0,25
6	–	–	–	2,049	19,871	2,048	19,840	0,04	0,16
7	–	–	–	2,114	18,518	2,112	18,510	0,10	0,04
8	–	–	–	2,058	17,748	2,053	17,730	0,22	0,10
9	–	–	–	2,072	18,433	2,071	18,420	0,04	0,07
10	0,056	6,001	0,000	0,459	13,939	0,458	13,940	0,24	-0,01
507Б, мидель									
1	0,271	–	–	2,792	16,348	2,793	16,340	-0,03	0,05
2	1,045	0,176	0,103	1,118	7,840	1,119	7,841	-0,12	-0,01
3	0,210	–	–	2,87	16,937	2,870	16,940	0,00	-0,02
4	–	–	–	3,062	21,691	3,061	21,680	0,04	0,05
5	–	–	–	2,938	21,579	2,926	21,530	0,41	0,23
6	–	–	–	3,000	21,637	3,000	21,610	0,01	0,12
7	–	–	–	3,072	20,497	3,071	20,490	0,03	0,03
8	–	–	–	2,965	19,365	2,957	19,320	0,26	0,23
9	–	–	–	2,997	20,159	2,996	20,130	0,03	0,14
10	0,0625	6,850	0,000	0,735	14,850	0,734	14,850	0,10	0,00
11	–	–	–	2,675	20,456	2,673	20,460	0,08	-0,02
507Б, 183 шп.,									
1	0,246	–	–	2,017	11,797	2,019	11,79	-0,08	0,06
2	0,745	0,178	0,026	0,865	6,461	0,867	6,466	-0,25	-0,08
3	0,195	–	–	2,099	12,337	2,100	12,34	-0,06	-0,02
4	–	–	–	2,325	17,275	2,324	17,27	0,03	0,03
5	–	–	–	2,228	17,194	2,219	17,16	0,40	0,20
6	–	–	–	2,279	17,237	2,279	17,22	-0,02	0,10
7	–	–	–	2,333	16,363	2,332	16,36	0,03	0,02
8	–	–	–	2,248	15,478	2,243	15,45	0,22	0,18
9	–	–	–	2,272	16,113	2,273	16,11	-0,03	0,02
10	0,051	5,467	0,000	0,411	11,813	0,410	11,82	0,38	-0,06

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нильва В.А. Оценка несущей способности корпуса сухогрузного судна смешанного плавания при потере части продольных связей // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2013. – Вип. 39. – С. 96-108.
2. Нильва В.А. Оценка несущей способности корпуса нефтеналивного судна смешанного плавания при потере части продольных связей // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2014. – Вип. 40. – С. 72-82.
3. Егоров Г.В. Разработка методов оптимизации прочностных решений при эксплуатации судов: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Одесса: ОИИМФ, 1993. – 43 с.
4. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Определения и накопленный опыт // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2005. – Вип. 18. – С. 57-72.
5. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Размеры повреждений и условия аварий // Проблеми техніки. – 2006. – № 1. – С. 3-23.
6. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. Критерии и примеры // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип. 19. – С. 49-63.
7. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечении борьбы за живучесть. (Учет стесненного кручения и крена) // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 2. – С. 39-48.
8. Егоров Г.В. Остаточная прочность корпуса в расчетах непотопляемости и обеспечения борьбы за живучесть. (Учет потери части продольных связей) // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – №3. – С. 38-50.

Стаття надійшла до редакції 15.09.2015

Рецензенти:

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету
В.В. Олейніков

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова» Одеського національного морського університету **О.В. Демідюк**