

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ  
FLEET AND SHIPBUILDING

**Тарануха Н. А., Журбин О. В., Журбина И. Н.**  
**N. A. Taranukha, O. V. Zhurbin, I. N. Zhurbina**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF INTERNAL AND EXTERNAL RESISTANCE DURING VIBRATION OF SHIP STRUCTURES**



**Тарануха Николай Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

**Mr. Nikolay A. Taranukha** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.



**Журбин Олег Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74. E-mail: zhurbin@pochta.ru.

**Mr. Oleg V. Zhurbin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74. E-mail: zhurbin@pochta.ru.



**Журбина Ирина Николаевна** – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск на Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; (4217) 54-30-74.

**Ms. Irina N. Zhurbina** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av.; (4217) 54-30-74.

**Аннотация.** Данная работа посвящена вопросам, связанным с решением задач динамики колеблющихся судовых конструкций. Рассмотрены присоединенные массы жидкости. Значительное внимание уделено учету сопротивления внешней и внутренней среды. Важное место в работе уделено экспериментально-численному моделированию задач по определению сопротивления внешней и внутренней среды. В частности здесь рассмотрено определение коэффициентов сопротивления для судовых систем, колеблющихся в воздухе, в воде, в дизельном топливе и в машинном масле.

**Summary.** The paper is concerned with the problems arising from the solution of tasks of the dynamics of vibrating ship structures. Added liquid masses are considered. Significant attention is given to the account of resistance of external and internal environment. An important place in the paper is given to experimental and numerical modeling of tasks of defining resistance of external and internal environments. In particular, definition of resistance coefficients for ship structures vibrating in the air, in water, in diesel fuel and in lubricating oil is considered.

**Ключевые слова:** кораблестроение, колебания, внутреннее и внешнее сопротивление, присоединённые массы, численное моделирование.

**Key words:** shipbuilding, vibration, internal and external resistance, added masses, numerical modeling.

### Введение

Исследование колебаний механических систем с учетом влияния сопротивления среды (внешней и внутренней) требует знания коэффициентов затухания и коэффициентов сопротивления этих сред. В данной работе в качестве внешних сред были выбраны четыре разные среды: воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло. Эти среды выбраны в качестве основных для колеблющихся судовых конструкций.

По природе своего возникновения и механизму воздействия [11, 12, 15] следует различать два вида неупругого сопротивления среды: неупругое сопротивление внутренней среды (внутри материала) и неупругое сопротивление внешней среды (например, сопротивления неупругого основания или окружающей вязкой жидкости).

### О природе внутреннего и внешнего сопротивления

Общепринятая мера внутреннего трения [2, 8, 11, 14] определяется из энергетических соображений и представляет отношение

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

где  $\Delta W$  – необратимо поглощенная телом за один цикл часть энергии циклических деформаций;  $W$  – потенциальная энергия тела, отвечающая амплитуде деформаций за тот же цикл.

Величину  $\psi$  называют коэффициентом поглощения.

При учёте динамических процессов удобнее оперировать величиной

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (2)$$

называемой коэффициентом внутреннего трения (внутреннего сопротивления).

Очень часто коэффициент поглощения  $\psi$  определяют по развертке свободных затухающих колебаний образца изучаемого материала через логарифмический декремент затухания:

$$\ln D = \ln \frac{w(t_1)}{w(t_1 + T)}. \quad (3)$$

Между  $\psi$ ,  $\ln D$  и  $\gamma$  существуют отношения:

$$\psi = 2 \ln D = 2\pi\gamma. \quad (4)$$

Для интереса и более глубокого понимания доли внутреннего поглощения энергии в материале укажем в табл. 1 численные значения коэффициента поглощения  $\psi_\sigma$ , приведенные в работе [7], а также численные значения коэффициента  $\gamma_\sigma$  для некоторых материалов и конструкций, с учетом [1, 3] и выражения (2). В этой же табл. 1 приведены коэффициенты  $\gamma_\sigma$  для различных сред, полученные экспериментально в данной работе.

Таблица 1

Значения коэффициентов поглощения энергии  $\psi$  и внутреннего сопротивления  $\gamma$  для некоторых материалов и конструкций и внешнего сопротивления  $\gamma$  для некоторых сред

Материал, конструкция, среда	$\psi_\sigma$ , [7]	$\gamma_\sigma$ , [1, 3, 11]
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<b>Материалы</b>		
Алюминий	0,02-0,04	0,003-0,006
Бетон	0,26	0,041
Дуб	0,11	0,017
Железобетон	0,25	0,040



Продолжение табл. 1

1	2	3
Латунь	0,01	0,002
Медь	0,33	0,053
Никель	0,03	0,005
Резина	0,20-1,20	0,032-0,190
Сосна	0,07	0,011
Сталь	0,01-0,03	0,002-0,005
Стеклопластик	0,20-0,40	0,032-0,064
Чугун серый	0,23	0,036
<b>Конструкции</b>		
Кирпичная кладка	0,25	0,040
Конструкция деревянная	0,30-0,35	0,048-0,056
Конструкция железобетонная	0,50	0,060-0,090
Конструкция стальная	0,16-0,18	0,025-0,028
Конструкция из стеклопластика	0,60-0,80	0,095-0,127
Стальные мосты	0,04-0,31	0,006-0,050
Судовые стальные днищевые перекрытия	0,40-0,60	0,064-0,095
Судовые стальные мачты	0,20-0,45	0,032-0,072
<b>Среды (<math>\gamma_{\sigma} = \gamma_{\text{экс}}</math>, получен в данной работе)</b>		
Внутреннее сопротивление стали $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}}$ (колебания консольной балки в вакууме)	-	0,003
Внешнее сопротивление воздуха $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$ (колебания консольной балки в воздухе)	-	0,001-0,002
Внешнее сопротивление воды $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вода}}$ (колебания консольной балки в воде)	-	0,017-0,027
Внешнее сопротивление дизельного топлива $\gamma_{\text{экс}}^{\text{диз.топливо}}$ (колебания консольной балки в дизельном топливе)	-	0,027-0,042
Внешнее сопротивление машинного масла $\gamma_{\text{экс}}^{\text{маш.масло}}$ (колебания консольной балки в машинном масле)	-	0,039-0,061

При этом важно было получить коэффициенты сопротивления именно среды (внутренней или внешней), а не коэффициенты сопротивления конкретной конструкции. Основная идея разделения коэффициентов сопротивления внутренней и внешней среды приведена ниже.

Внешнее сопротивление среды, например для судна – это сопротивление забортной воды или жидких нефтепродуктов [11] в отсеках танкеров и топливных цистернах судов других типов. Считается, что этот коэффициент зависит от свойств внешней среды и может быть определен только экспериментально.

#### Экспериментальное моделирование задачи по определению коэффициентов сопротивления внутренней и внешней среды

В качестве внешних сред, которые являются основными для судовых конструкций в процессе эксплуатации и которые оказывают наибольшее сопротивление, были выбраны: воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло [11, 15].

Воздух – среда, не оказывающая существенного сопротивления колеблющейся системе. Однако, как показывают экспериментальные исследования, это влияние всё же есть и зависит оно в основном от площади "парусности" колеблющейся системы.

Вода – основная внешняя среда для всех объектов морской и речной техники.

Дизельное топливо – среда, с которой взаимодействуют колеблющиеся конструкции топливных танков большинства судов и танкеров, перевозящих легкие нефтепродукты.

Машинное масло – среда, с которой взаимодействуют колеблющиеся конструкции масляных танков обычных судов и танкеров, перевозящих тяжелые нефтепродукты.

На рис. 1 изображена экспериментальная установка, которая предназначена для определения параметров сопротивления при свободных гидроупругих колебаниях консоли, с точечной массой на свободном конце. Установка позволяет произвести определение амплитудно-частотных характеристик, коэффициентов затухания и коэффициентов сопротивления внешней и внутренней среды колеблющейся системы.

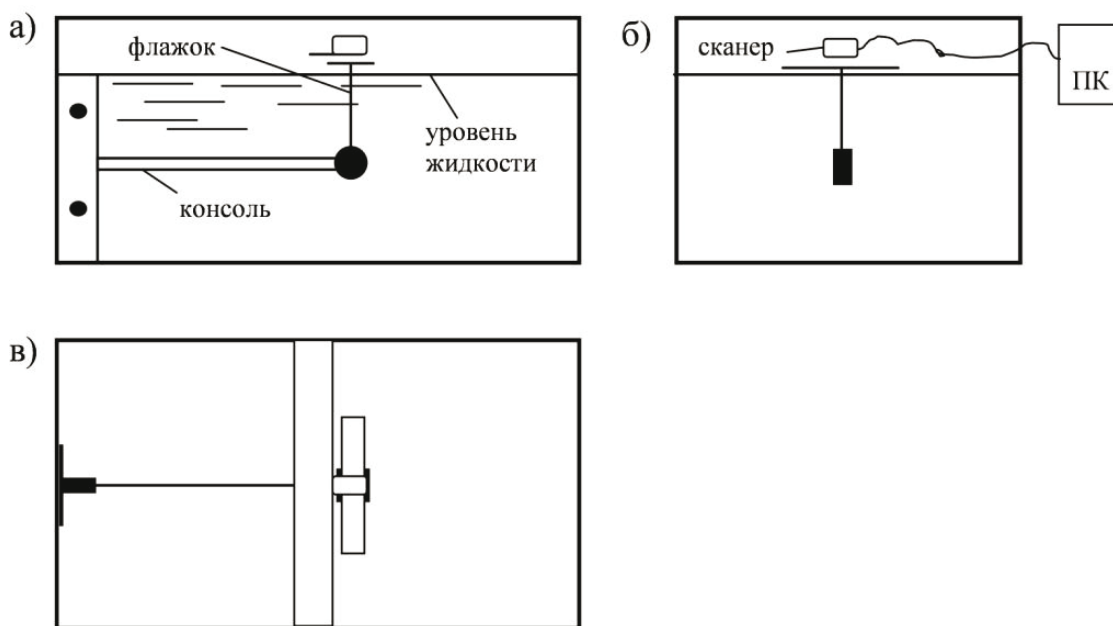


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
а – вид справа; б – вид спереди; в – вид сверху

Рассмотрим свободные колебания консольной балки, имеющей прямоугольное сечение  $b \times h$  (см. рис. 2).

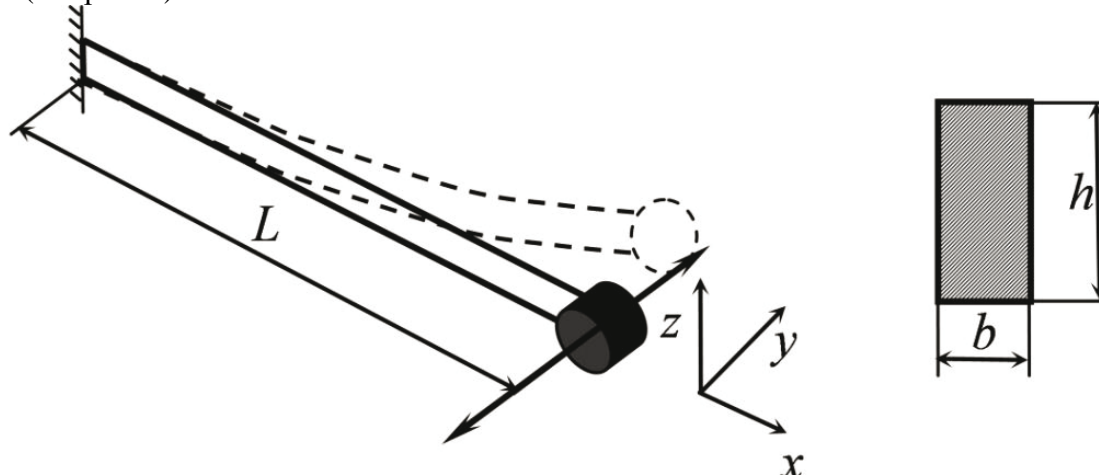


Рис. 2. Расчётная схема балки-консоли

Параметры балки и материала следующие:  $L = 0,335$  м,  $b = 0,0023$  м,  $h = 0,012$  м,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $m_{гр} = 0,421$  кг,  $m_{блк} = 0,072 \frac{H}{M} \cdot c^2$ ,  $m = m_{гр} + m_{блк} = 0,493$  кг,  $E = 2,0e11$  Н/м.

Левый торец балки жёстко закреплён, правый – свободен и имеет сосредоточенную массу в виде груза. Балка совершает колебательные движения в направлении оси  $y$ .

Для проведения эксперимента были выбраны грузы с одной массой (0,421 кг), но разными площадями парусности (см. рис. 3 и табл. 2). В общую площадь парусности входит также и площадь парусности самой балки без учёта перекрываемой части грузом (см. табл. 2).

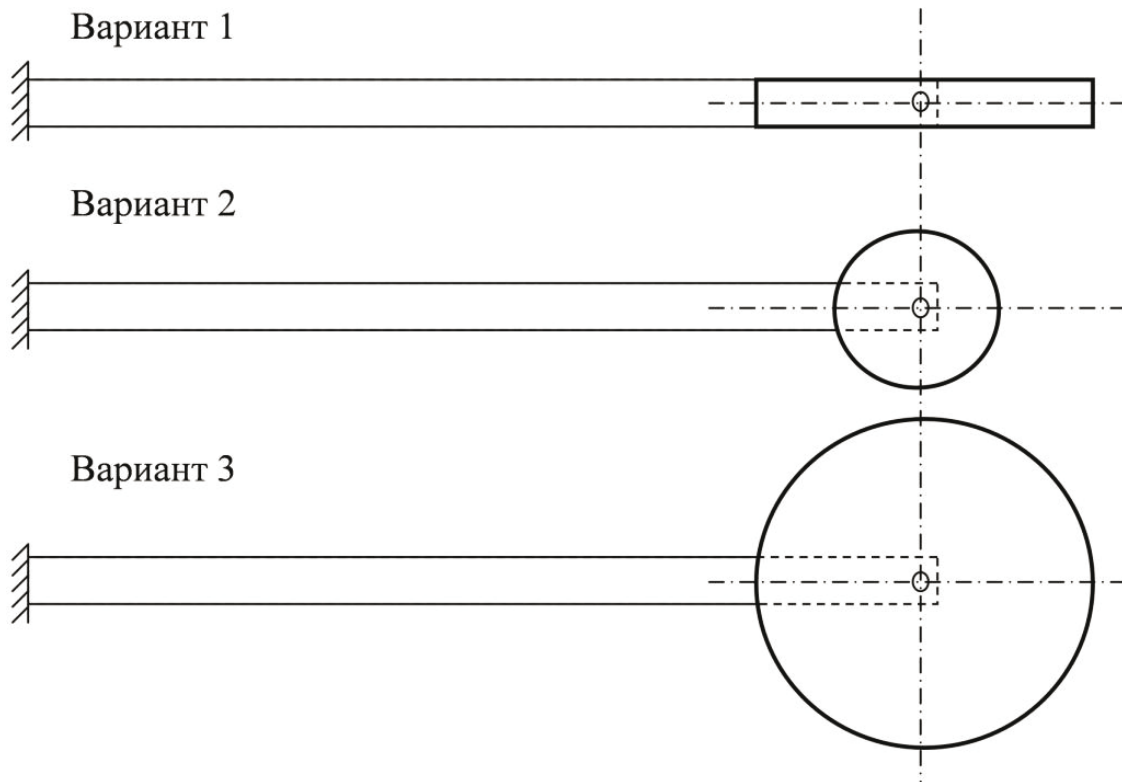


Рис. 3. Варианты схем балки-консоли

Таблица 2

Вычисления общей площади парусности

Вариант	Диаметр поверхности груза $d_{гр.},$ м	Площадь парусности груза $S_{гр.},$ м <sup>2</sup>	Площадь парусности балки $S_{блк.},$ м <sup>2</sup>	Перекрываемая площадь $S_{пер.},$ м <sup>2</sup>	Общая площадь парусности $S,$ м <sup>2</sup>
1	66·E-3	0.792·E-3	4.020·E-3	0.516·E-3	4.296·E-3
2	35·E-3	0.962·E-3	4.020·E-3	0.330·E-3	4.652·E-3
3	66·E-3	3.421·E-3	4.020·E-3	0.516·E-3	6.925·E-3

Для определённости перечислим коэффициенты и некоторые их зависимости для дальнейшего использования:

$$n = \frac{\ln D}{T}, \left( \frac{1}{c} \right) - \text{затухания};$$

$$\beta = 2 \cdot m \cdot n, \left( \frac{H}{M} \cdot c \right) - \text{сопротивления, используемый в ММЭ};$$

$\psi = 2 \ln D$  – поглощения;

$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}$  – внутреннего сопротивления (трения).

Для определения перечисленных коэффициентов необходимо экспериментально определить период  $T$  и декремент  $D$ . Декремент  $D$  определим через отношение амплитуд двух соседних колебаний  $w_{эксн}(t_1)$  и  $w_{эксн}(t_1+T)$ .

На рисунке 4 изображён экспериментально полученный график затухающих колебаний.

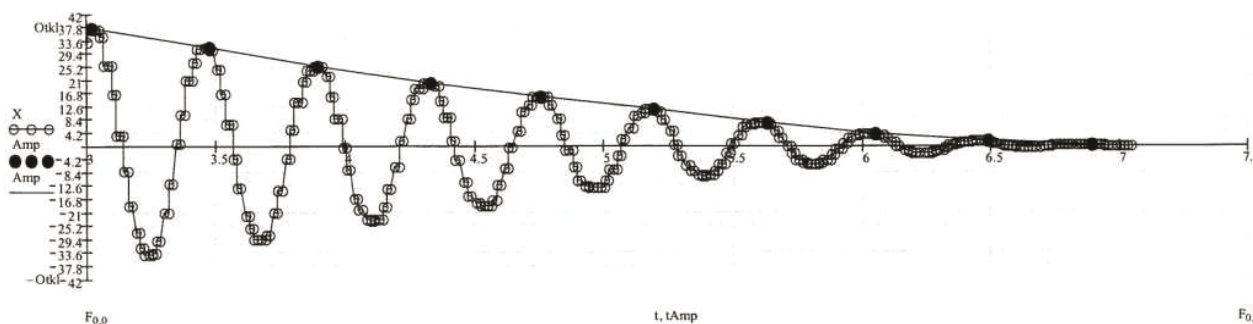


Рис. 4. График затухающих колебаний консольной балки с концевым грузом в воздухе

В результате экспериментов были получены коэффициенты ( $n_{экс}$ ,  $\beta_{экс}$ ,  $\psi_{экс}$ ,  $\gamma_{экс}$ ) приведенные в табл. 3. На рис. 5 – 10 показаны графики зависимостей периода  $T$ , декремента  $D$ , коэффициента затухания  $n_{экс}$ , коэффициент сопротивления  $\beta_{экс}$ , коэффициент поглощения  $\psi_{экс}$  и коэффициент внутреннего трения  $\gamma_{экс}$  в зависимости от площади парусности в четырёх различных средах (воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло). Графики позволяют проследить тенденцию изменения указанных выше показателей в зависимости от площади парусности и дают возможность выйти на "нулевую парусность", т.е. колебание в вакууме. Значения экспериментальных точек на графиках (см. рис. 5 – 10) соответствуют вариантам с рис. 3 и приведены в табл. 3.

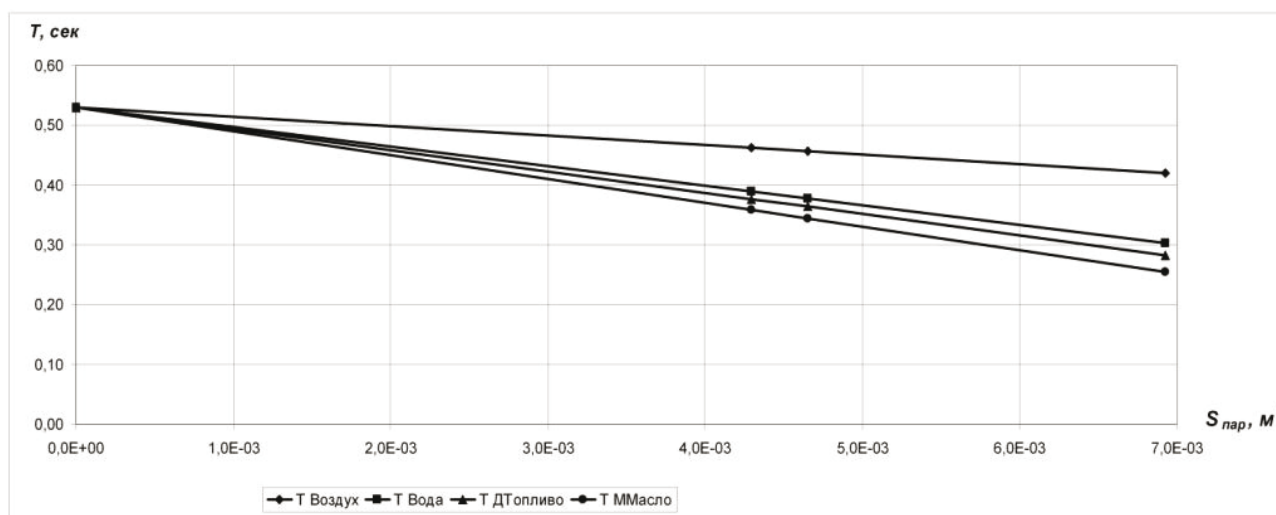


Рис. 5. График зависимости периода  $T$  от площади парусности



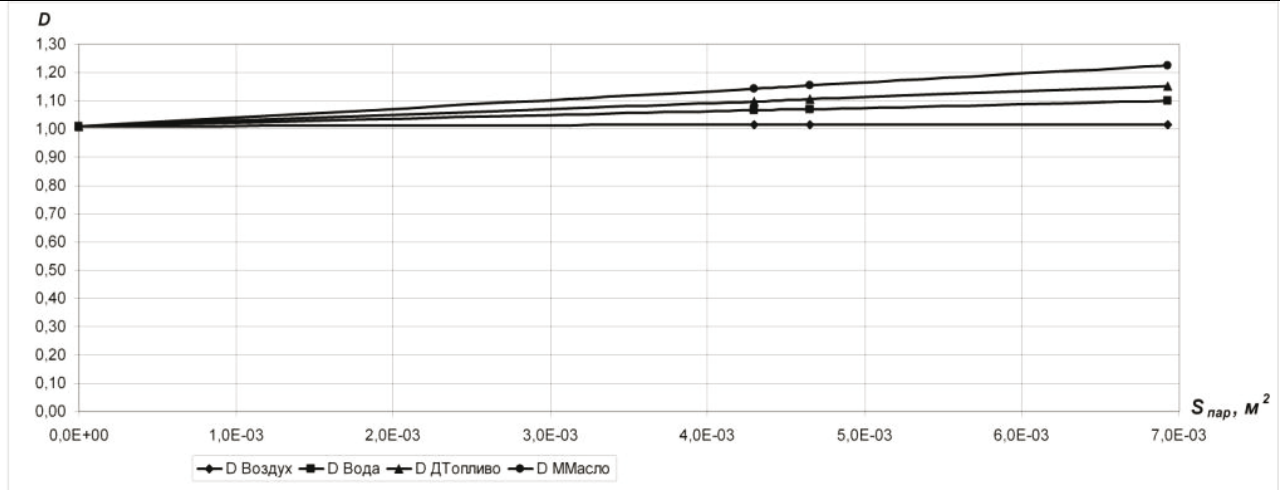


Рис. 6. График зависимости декремента  $D$  от площади парусности

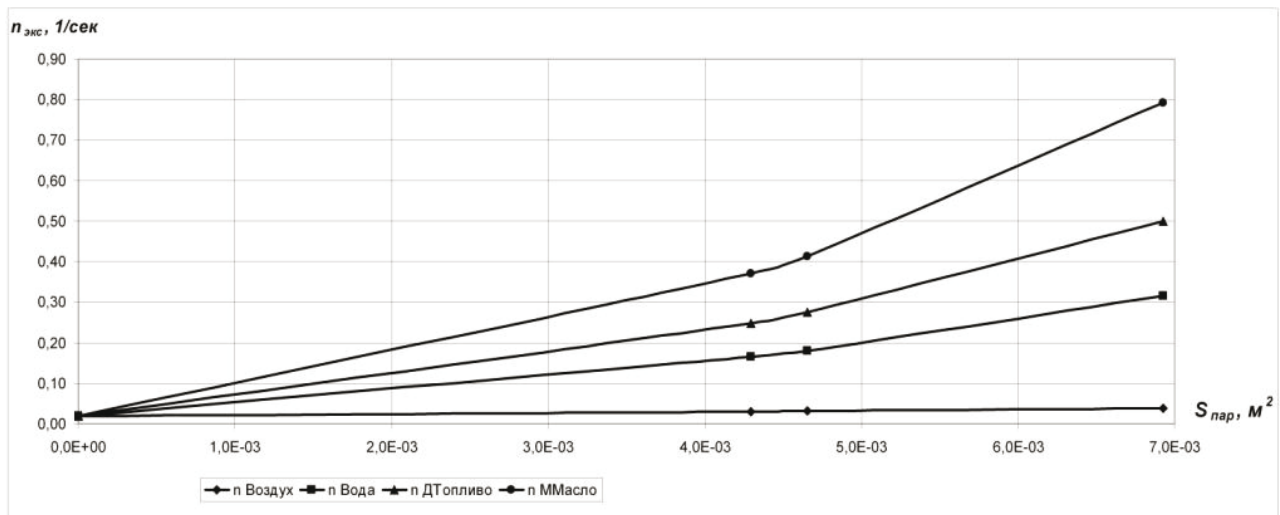


Рис. 7. График зависимости коэффициента затухания  $n_{\text{экс}}$  от площади парусности

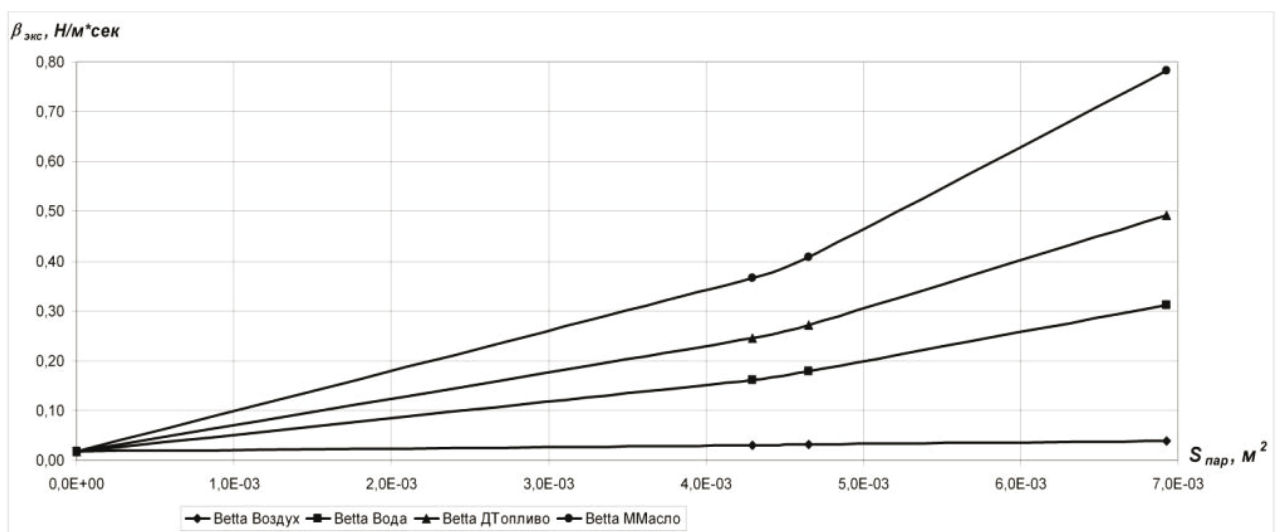


Рис. 8. График зависимости коэффициента сопротивления  $\beta_{\text{экс}}$  от площади парусности

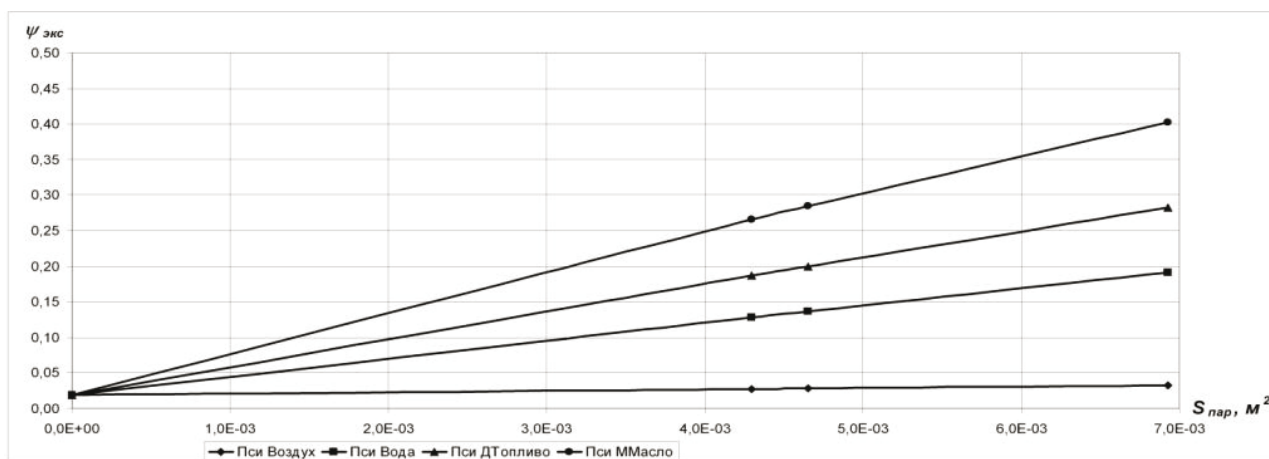


Рис. 9. График зависимости коэффициента поглощения  $\psi_{экс}$  от площади парусности

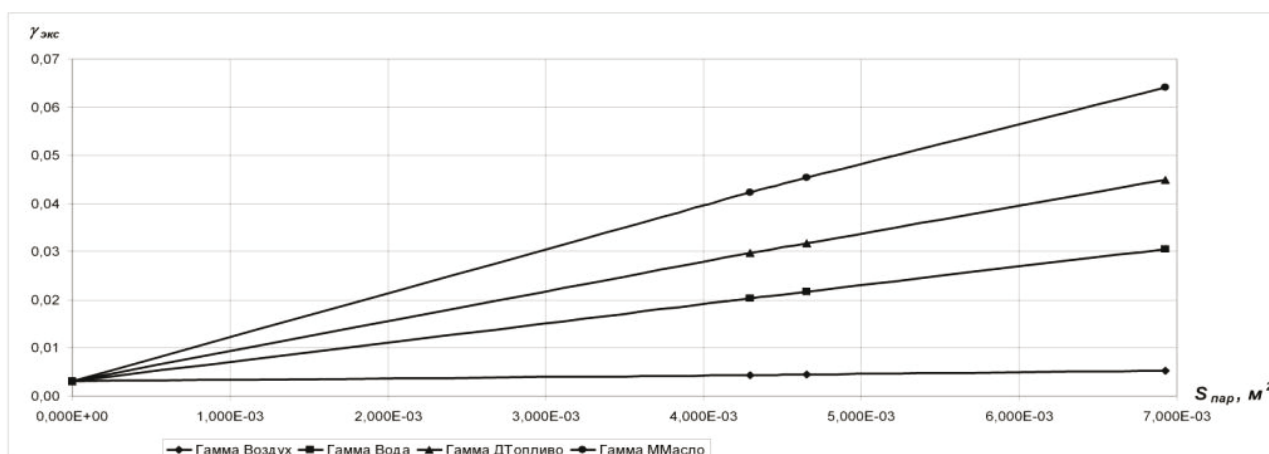


Рис. 10. График зависимости коэффициента внутреннего сопротивления  $\gamma_{экс}$  от площади парусности

В графе "Вариант" (см. табл. 3) указаны варианты расположения груза на конце консоли (см. рис. 3) и соответствующие им (вариантам) площади парусности в графе "Площадь парусности".

Поясним основную идею выхода на "нулевую парусность".

Для получения величины периода  $T$  и декремента  $D$  при нулевой парусности (см. вариант 0 из табл. 3) была проведена аппроксимация трёх экспериментальных точек. Независимо от типа внешней среды, период и декремент, при нулевой парусности, явно сошлись к одной величине, а именно 0,52932 с и 1,00966 соответственно (см. табл. 3, вариант 0).

Численное значение коэффициента сопротивления  $\gamma_{экс}^{нуль} = 0,00306$ , полученного при нулевой парусности, попадает в известный табличный диапазон (см. табл. 1). Это, в свою очередь, подтверждает правильность экспериментальных данных, корректность проведённого эксперимента и справедливость идеи выхода на "нулевую парусность", а также указывает на тот факт, что коэффициент сопротивления (при нулевой парусности) найден именно для внутренней среды, а не для конструкции.



Таблица 3

Значения экспериментальных коэффициентов ( $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ), полученных при колебаниях стальной консольной балки в воздухе, воде, дизельном топливе и машинном масле

Вариант	Площадь парусности $S$ , м <sup>2</sup>	Период $T$ , с	Декремент $D$	Коэф. затухания $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$ , 1/с	Коэф. сопротивления в ММЭ $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$ , $\frac{H}{M} \cdot c$	Коэф. поглощения $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$	Коэф. сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$
<b>Колебания в вакууме</b>							
0	0	0,52932	1,00966	0,01816	0,01790	0,01922	0,00306
<b>Колебания в воздухе</b>							
1	4,296E-3	0,46176	1,01394	0,02997	0,02955	0,02768	0,00441
2	4,652E-3	0,45616	1,01429	0,03110	0,03067	0,02838	0,00452
3	6,925E-3	0,42042	1,01655	0,03905	0,03851	0,03284	0,00523
<b>Колебания в воде</b>							
1	4,296E-3	0,38875	1,06590	0,16417	0,16188	0,12765	0,02032
2	4,652E-3	0,37710	1,07057	0,18082	0,17829	0,13637	0,02171
3	6,925E-3	0,30272	1,10033	0,31583	0,31141	0,19121	0,03043
<b>Колебания в дизельном топливе</b>							
1	4,296E-3	0,37636	1,09778	0,24789	0,24442	0,18659	0,02970
2	4,652E-3	0,36368	1,10509	0,27477	0,27092	0,19985	0,03181
3	6,925E-3	0,28274	1,15172	0,49960	0,49260	0,28251	0,04496
<b>Колебания в машинном масле</b>							
1	4,296E-3	0,35853	1,14206	0,37050	0,36531	0,26567	0,04228
2	4,652E-3	0,34437	1,15304	0,41350	0,40772	0,28480	0,04533
3	6,925E-3	0,25400	1,22309	0,79284	0,78174	0,40276	0,06410

Здесь в табл. 3 коэффициенты  $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$  являются суммарными коэффициентами, содержащими в себе сопротивление внутренней среды (стали) и сопротивление внешней среды (или вакуума, или воздуха, или воды, или дизельного топлива, или машинного масла). Задача дальнейшего исследования заключается в разделении всех указанных составляющих сопротивления. Делается это следующим образом. Если считать, что внешнее сопротивление вакуума равно нулю, то тогда суммарные коэффициенты в строке "0" фактически являются коэффициентами только внутренней среды балки, т.е. в данном случае стали.

Разобьём коэффициенты на составляющие от внутреннего и внешнего сопротивления по примеру разбиения коэффициента сопротивления  $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$  воздуха:

$\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = \gamma_{\text{экс. вариант 0}}^{\Sigma} = 0,00306$  – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления внутренней среды балки (стали), считая, что вакуум не оказывает внешнего сопротивления;

$\gamma_{\text{экс. вариант 1}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс. вариант 1}}^{\Sigma \text{ воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00441 - 0,00306 = 0,00135$  – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 1 боковой поверхности балки и груза);

$\gamma_{\text{экс. вариант 2}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс. вариант 2}}^{\Sigma \text{ воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00452 - 0,00306 = 0,00146$  – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 2 боковой поверхности балки и груза);

$\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\Sigma \text{воздух}} - \gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = 0,00523 - 0,00306 = 0,00217$  – коэффициент сопротивления от неупругого сопротивления воздушной среды (см. рис. 3, вариант 3 боковой поверхности балки и груза).

Поясним вычисления на рис. 11.

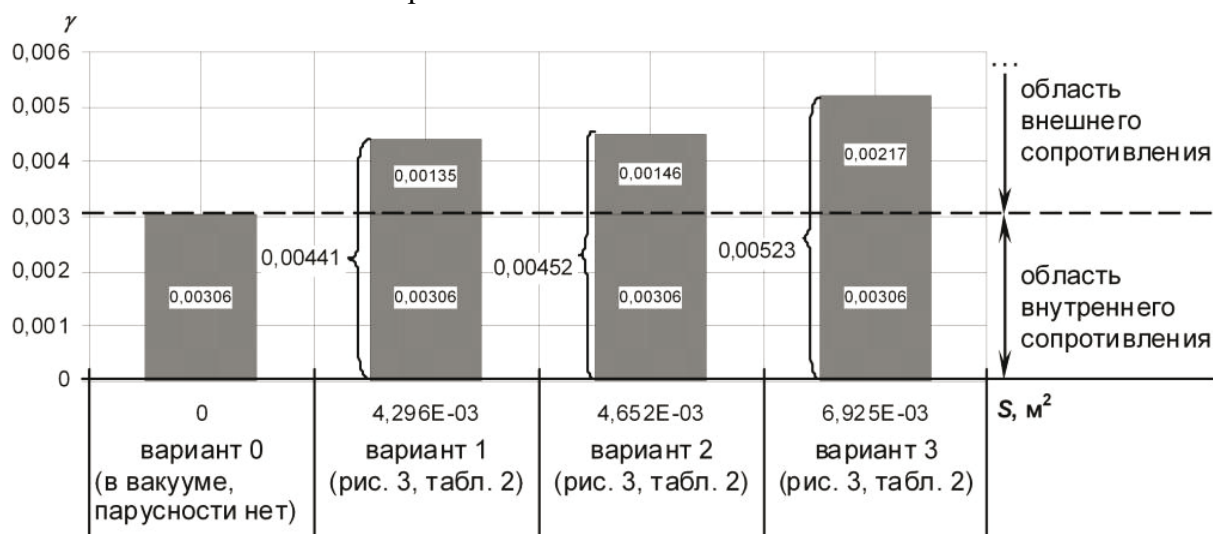


Рис. 11. К вычислению составляющих коэффициента сопротивления  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$

Если выполнить аналогичные вычисления для всех коэффициентов ( $n_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\beta_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\psi_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\Sigma}$ ) и всех внешних сред (вакуум, воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло), то получим, таким образом, разделенные коэффициенты (например  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вакуум}}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{вода}}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{диз.топливо}}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{маш.масло}}$ ) отдельно для всех внешних сред без учета внутреннего сопротивления. Эти коэффициенты приведены в табл. 1. Коэффициент внутреннего сопротивления стали  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внут}} = \gamma_{\text{экс}}^{\text{вакуум}} = 0,00306$ , также приведен в табл. 1. Отметим, что полученный коэффициент сопротивления для стали полностью совпадает со значениями этого коэффициента, полученными другими авторами [1, 3, 11].

Рассчитаем удельный коэффициент сопротивления в воздухе (по отношению к площади парусности):

$$\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 1}}} = 0,31294 \frac{1}{\text{м}^2};$$

$$\gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 2}}} = 0,31329 \frac{1}{\text{м}^2};$$

$$\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{воздух}}}{S_{\text{вариант 3}}} = 0,31334 \frac{1}{\text{м}^2}.$$

Близость удельных коэффициентов позволяет заключить, что удельные коэффициенты не зависят от площади парусности. Это обстоятельство позволит в дальнейшем, не прибегая к эксперименту, использовать в расчетных моделях коэффициенты сопротивления внешней среды – домножая удельные коэффициенты на площадь парусности конструкции.

Возьмем среднее значение удельного коэффициента сопротивления:

$$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} = \frac{\gamma_{\text{экс.вариант 1}}^{\text{уд.воздух}} + \gamma_{\text{экс.вариант 2}}^{\text{уд.воздух}} + \gamma_{\text{экс.вариант 3}}^{\text{уд.воздух}}}{3} = 0,31319 \frac{1}{\text{м}^2}.$$



Проведём аналогичные вычисления для всех коэффициентов и всех внешних сред. Сведём эти показания в табл. 4. При этом для приведения удельных коэффициентов к одной размерности с самими коэффициентами, а также для удобства дальнейшего использования домножим их на площадь парусности  $S$ .

Например:  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S = 0,31319 \cdot S$ . А это, в свою очередь, и есть коэффициент сопротивления внешней среды, т.е.  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{воздух}} = \gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S = 0,31319 \cdot S$ .

Таблица 4

Значения экспериментальных составляющих коэффициентов ( $n_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ,  $\beta_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ,  $\psi_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ,  $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ) от влияния внешней среды, полученных при колебаниях стальной консольной балки в воздухе, воде, дизельном топливе и машинном масле

Вариант	Площадь парусности $S, \text{ м}^2$	Коэф. затухания $n_{\text{экс}}^{\text{внеш}}, \frac{1}{\text{с}}$	Коэф. сопротивления в ММЭ $\beta_{\text{экс}}^{\text{внеш}}, \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{с}$	Коэф. поглощения $\psi_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$	Коэф. сопротивления $\gamma_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$
<b>Воздух</b>					
1	4,296E-3	0,01181	0,01165	0,00846	0,00135
2	4,652E-3	0,01294	0,01277	0,00916	0,00146
3	6,925E-3	0,02089	0,02060	0,01362	0,00217
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности $S$ :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$ 2,85026 · $S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$ 2,81036 · $S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$ 1,96776 · $S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.воздух}} \cdot S$ 0,31319 · $S$
<b>Вода</b>					
1	4,296E-3	0,14602	0,14397	0,10842	0,01726
2	4,652E-3	0,16267	0,16039	0,11715	0,01865
3	6,925E-3	0,29767	0,29350	0,17199	0,02737
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности $S$ :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$ 37,31305 · $S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$ 36,79067 · $S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$ 25,08588 · $S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.вода}} \cdot S$ 3,99266 · $S$
<b>Дизельное топливо</b>					
1	4,296E-3	0,22973	0,22652	0,16737	0,02664
2	4,652E-3	0,25661	0,25302	0,18063	0,02875
3	6,925E-3	0,48144	0,47470	0,26329	0,04191
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности $S$ :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$ 59,38559 · $S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$ 58,55419 · $S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$ 38,60229 · $S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.диз.топ}} \cdot S$ 6,14393 · $S$
<b>Машинное масло</b>					
1	4,296E-3	0,35234	0,76384	0,24645	0,03922
2	4,652E-3	0,39535	0,38981	0,26558	0,04227
3	6,925E-3	0,77469	0,34741	0,38354	0,06104
Осреднённый удельный коэффициент, умноженный на площадь парусности $S$ :		$n_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$ 92,95475 · $S$	$\beta_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$ 91,65338 · $S$	$\psi_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$ 56,61249 · $S$	$\gamma_{\text{экс}}^{\text{уд.м.масло}} \cdot S$ 9,01042 · $S$

## Выводы

- В ходе экспериментальных исследований, кроме коэффициентов внутреннего сопротивления, были получены коэффициенты внешнего сопротивления для некоторых видов

**Тарануха Н. А., Журбин О. В., Журбина И. Н.**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

внешних сред (воздух, вода, дизельное топливо и машинное масло). Выбор указанных сред связан с тем, что они встречаются в задачах о колебаниях судовых конструкций.

- Получены удельные коэффициенты, позволяющие в дальнейшем, не прибегая к эксперименту, использовать в расчетных моделях коэффициенты сопротивления внешней среды – домножая удельные коэффициенты на площадь парусности конструкции.

- Полученный экспериментальный коэффициент сопротивления для стали полностью совпадает со значениями этого коэффициента, полученными другими авторами [1, 3, 11]. Это подтверждает корректность проведенных экспериментов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Антоненко, С. В. Вибрация судов: учеб. пособие / С. В. Антоненко – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 148 с.
2. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановко – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 196 с.
3. Постнов, В. А. Вибрация корабля / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
4. Постнов, В. А. Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
5. Постнов, В. А. Оценка напряженно-деформированного состояния корпуса судна методом модуль-элементов / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха // Судостроение. – 1983. – № 5. – С. 5-8.
6. Прочность, устойчивость, колебания: справочник. В 3 т. Т. 3 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 464 с.
7. Сборовский, А. К. Вибрация судов с корпусами из стеклопластиков / А. К. Сборовский, Ю. А. Никольский, В. Д. Попов – Л.: Судостроение, 1967 – 191 с.
8. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е. С. Сорокин – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
9. Сорокин, Е. С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания / Е.С. Сорокин // Исследования по динамике сооружений. – М.: Госстройиздат, 1951. – С. 34-41.
10. Тарануха, Н. А. Динамика «неправильных» оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 423 с.
11. Тарануха, Н. А. Математическое и экспериментальное моделирование колебаний стержневых судовых конструкций с учётом сопротивления внешней среды различной плотности / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, И. Н. Журбина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. № IV-1(4). – С. 81-91.
12. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебаний сложных оболочек. Гидроупругая постановка с учетом сопротивления / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 253 с.
13. Тарануха, Н. А. Метод модуль-элементов в расчетах прочности тонкостенных конструкций / Н.А. Тарануха // Труды ЛКИ: Механика и прочность судовых конструкций. – 1980. – С. 113-117.
14. Тарануха, Н. А. Новые решения в динамике "неправильных" оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 203 с.
15. Тарануха, Н. А. Численное моделирование прочности и гидродинамики океанотехники / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, С. Д. Чижиумов, И. Н. Журбина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 340 с.
16. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко – М.: Наука, 1967. – 444 с.
17. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Норейко – М.: Высшая школа, 1966. – 255 с.
18. <http://www.mssoftware.com/Products/CAE-Tools/MS-CNastran.aspx>