

УДК 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-2-128-137

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЁТНЫХ
ЗНАЧЕНИЙ РАЗРУШАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
С ЛИНЕЙНО ВОЗРАСТАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ**

А.В. Коноплёв

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение»

А.Н. Шумило

к.т.н., профессор, доцент кафедры «Машиноведение»

Е.К. Рожко

ассистент кафедры «Прикладная механика»

В.В. Галевский, О.Н. Кононова

старшие преподаватели кафедры «Машиноведение»

Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

Аннотация. В статье проведена сравнительная оценка экспериментальных и расчётных значений разрушающих напряжений при линейно возрастающей скорости увеличения нагрузки.

Для этого были использованы корреляционные зависимости между пределом выносливости и параметрами наклонного участка кривой усталости, выраженной степенным уравнением и уравнением Вейбулла. Показано, что минимальное расхождение между экспериментальными и расчётными значениями разрушающих напряжений имеет место в случае использования корреляционных зависимостей между параметрами уравнения Вейбулла. Полученные результаты дают возможность расчётным путем прогнозировать систематическую погрешность ускоренных методов определения усталостной прочности объектов, в которых используется принцип плавного нагружения при линейно возрастающей нагрузке.

Ключевые слова: ускоренные испытания, разрушающее напряжение, скорость увеличения нагрузки.

УДК 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-2-128-137

**ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ І РОЗРАХУНКОВИХ
ЗНАЧЕНЬ РУЙНІВНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ
З ЛІНІЙНО ЗРОСТАЮЧИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

А.В. Конопльов

д.т.н., професор, завідувач кафедри «Машинознавство»

О.М. Шумило

к.т.н., професор, доцент кафедри «Машинознавство»

О.К. Рожко

асистент кафедри «Прикладна механіка»

В.В. Галевський, О.М. Кононова

старші викладачі кафедри «Машинознавство»

Одеський національний морський університет

Анотація. У статті проведена порівняльна оцінка експериментальних і розрахункових значень руйнівних напружень при лінійно зростаючій швидкості збільшення навантаження.

Для цього були використані кореляційні залежності між межею витривалості і параметрами похилої ділянки кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням і рівнянням Вейбулла. Показано, що мінімальне розходження між експериментальними і розрахунковими значеннями руйнівних напружень має місце в разі використання кореляційних залежностей між параметрами рівняння Вейбулла. Отримані результати дають можливість розрахунковим шляхом прогнозувати систематичну похибку прискорених методів визначення втомної міцності об'єктів, в яких використовується принцип плавного навантаження при лінійно зростаючому навантаженні.

Ключові слова: прискорені випробування, руйнівне напруження, швидкість збільшення навантаження.

UDC 620:178.3

DOI 10.47049/2226-1893-2021-2-128-137

COMPARATIVE ASSESSMENT OF EXPERIMENTAL
AND CALCULATED VALUES OF BREAKING TENSIONS DURING TESTS
WITH A LINEARLY INCREASING LOAD

A.V. Konoplev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of «Machine Science»

A.N. Shumilo

Ph.D Associate Professor of the Department of «Machine Science»

E.K. Rozhko

Assistant of the Department «Applied mechanics»

V.V. Halevskiy, O.N. Kononova

Senior Lecturers of the Department «Machine Science»

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Abstract. The article provides a comparative assessment of the experimental and calculated values of the breaking tensions at a linearly increasing rate of increase in the load.

For this, the correlations between the endurance limit and the parameters of the inclined portion of the fatigue curve expressed by the power equation and the Weibull equation were used. It is shown that the minimum discrepancy between the experimental and calculated values of the breaking tensions occurs in the case of using the correlation dependences between the parameters of the Weibull equation. The results obtained make it possible by calculation to predict the systematic error of accelerated methods for determining the fatigue strength of objects, in which the principle of smooth loading with a linearly increasing load is used.

Keywords: accelerated testing, breaking tension, load increase rate.

Введение. Вопросы материалоемкости и качества всегда находились в центре внимания предприятий, занимающихся производством и ремонтом изделий машиностроения. Высокое качество продукции и оптимальная материалоемкость достигаются тщательной обработкой каждой детали, а, следовательно, и изделия в целом на всех этапах её создания, модернизации или ремонта.

Применение современных методов расчёта несущей способности деталей и элементов конструкций позволяют обеспечить минимальную их материалоемкость. Тем не менее, в ряде случаев, например, для проверки принятого конструктивного решения или при контроле качества серийно выпускаемой продукции часто возникает необходимость в проведении натуральных испытаний на сопротивление усталости деталей или их отдельных элементов. Натурные испытания могут также понадобиться в случае контроля процесса восстановления деталей различными способами (наплавкой, напылением, гальваническими покрытиями и др.). Такие испытания актуальны и при замене одного материала другим, близким ему по свойствам.

Испытание деталей на сопротивление усталости обычными методами для получения соответствующих характеристик с требуемой степенью точности требует большого количества объектов испытаний и большой продолжительности эксперимента, т.е. связано с большими материальными затратами. Особенно это касается испытаний по определению предела выносливости на большой базе. Принимая во внимание сказанное, напрашивается вывод о целесообразности замены длительных испытаний ускоренными, которые при сохранении точности позволили бы существенно сократить время испытаний и количество испытываемых объектов. Запрос на разработку ускоренных методов привёл к формированию отдельного направления, объединившего различные подходы к решению данной проблемы. В частности в последние годы в рамках этого направления были исследованы вопросы разработки новых и совершенствования существующих ускоренных методов, их точности и классификации [1; 2.].

Настоящая статья посвящена одному из этих вопросов, в частности, вопросу оценки точности ускоренных методов, в которых используется принцип плавного увеличения нагрузки в процессе проведения эксперимента. Согласно упомянутой выше классификации ускоренные методы, основанные на таком подходе, объединены общим режимным признаком.

Целью статьи является проверка соответствия расчётных и экспериментальных разрушающих напряжений, соответствующих режиму плавного линейного увеличения нагрузки.

Изложение основного материала. Для расчётного определения разрушающих напряжений примем три исходные предпосылки. Во-первых, будем полагать, что при увеличении амплитуды напряжений суммирование усталостных повреждений подчинено линейной гипотезе.

Во-вторых, в качестве модели кривой усталости примем для сравнения два уравнения – степенное и Вейбулла. В-третьих, параметры этих уравнений будем определять на основе их корреляционных зависимостей от предела выносливости. Схема линейного нагружения объекта (образца, детали, модели, отдельного элемента и др.) с постоянной скоростью увеличения амплитуды напряжений $\alpha = d\sigma/dN$ представлена на рис. 1.

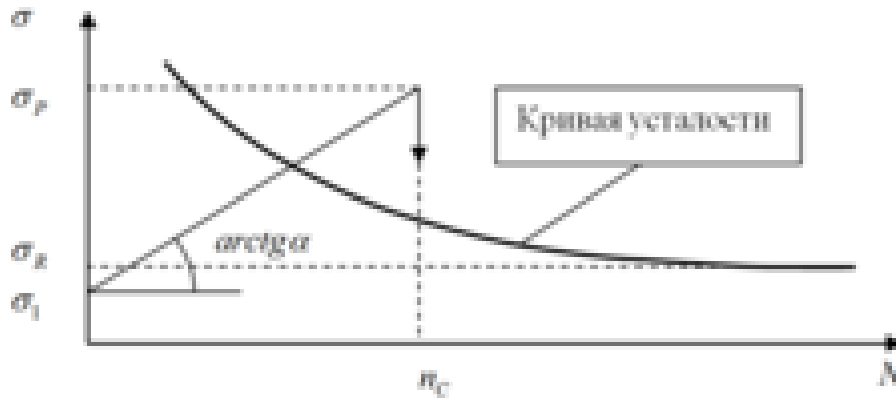


Рис. 1. Схема испытаний объектов при линейно увеличивающейся амплитуде напряжений

На рисунке приняты следующие обозначения:

σ_R – предел выносливости;

σ и N – текущие значения напряжений и числа циклов соответственно;

σ_1 – начальное напряжение;

n_C – суммарное число циклов до окончательного разрушения, регистрируемое счётчиком числа оборотов;

σ_P – напряжение, при котором произошло разрушение, которое, как видно из рис. 1, можно определить по формуле

$$\sigma_P = \sigma_1 + \alpha n_C, \quad (1)$$

Параметры наклонных участков кривых усталости степенного уравнения m_C и C_C , а также уравнения Вейбулла m_W и C_W будем определять с помощью известных выражений [3; 4]

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (2)$$

$$C_C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C(m_C + 1) \lg \sigma_R + \beta_C; \quad (3)$$

$$m_W = f_W(\sigma_R) = \frac{1}{a_{W1}\sigma_R^{0,01} - b_{W1}} - 1 = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1; \quad (4)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{W1}\sigma_R + \beta_{W1})^{m_W+1}}{m_W+1} = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_W+1}}{m_W+1}, \quad (5)$$

где $a_C, b_C, \alpha_C, \beta_C, a_{W1}, b_{W1}, \alpha_{W1}, \beta_{W1}$ – эмпирические коэффициенты. Для объектов из углеродистых и легированных сталей принимают: $a_C = 0,027; b_C = 1,4; \alpha_C = 0,997; \beta_C = 4,0 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_R)^2$, при $\lg \sigma_R \geq 2,5$ $\beta_C = 4,0$ (в среднем $\beta_C = 4,25$).

Расчётные величины разрушающих напряжений при выбранных значениях скорости увеличения нагрузки α будем определять по следующим формулам

$$\sigma_P^C = [\sigma_R^{m_C+1} + \alpha(m_C + 1)10^{C_C}]^{1/(m_C+1)}; \quad (6)$$

$$\sigma_P^W = \sigma_R + [\alpha(m_W + 1)10^{C_W}]^{1/(m_W+1)}. \quad (7)$$

Для сравнения расчётных и экспериментальных значений разрушающих напряжений воспользуемся приведенными в литературе [5] результатами испытаний гладких и надрезанных лабораторных образцов при круговом изгибе, изготовленных из двух марок конструкционной стали (45 и 40X). Предварительно для них определим параметры m_C, C_C, m_W и C_W . Результаты расчёта приведены в табл. 1.

В таблице приняты обозначения: образцы I типа – гладкие, а II типа – надрезанные. Результаты расчёта величин разрушающих напряжений σ_P^C и σ_P^W по формулам (6) и (7), а также средние значения $\sigma_P^{\text{—}\text{Э}}$, рассчитанные по экспериментальным данным, приведены в табл. 2. В этой же таблице приведены отклонения расчётных и экспериментальных разрушающих напряжений для двух сравниваемых уравнений кривой усталости $\delta_{\sigma_P^C}, \delta_{\sigma_P^W}$, которые были определены по следующим формулам:

$$\delta_{\sigma_P^C} = \frac{\sigma_P^C - \sigma_P^{\text{—}\text{Э}}}{\sigma_P^{\text{—}\text{Э}}} \cdot 100; \quad (8)$$

$$\delta_{\sigma_P^W} = \frac{\sigma_P^W - \sigma_P^{\text{—}\text{Э}}}{\sigma_P^{\text{—}\text{Э}}} \cdot 100. \quad (9)$$

Таблица 1

Результаты расчёта параметров кривых усталости
для гладких и надрезанных образцов при круговом изгибе

Тип образца	Материал	σ_R , МПа	m_C	C_C	m_W	C_W
I	Сталь 45	250	18,1818	50,0364	0,9446	6,9622
II	Сталь 45	145	6,6667	21,0067	1,0657	7,2547
I	Сталь 40X	274	18,8679	52,3962	0,9255	6,9213
II	Сталь 40X	159	7,7519	23,1550	1,0442	7,1992

Средние расчётные значения $\bar{\sigma}_P$ определяли с целью оценки их близости к экспериментальным данным по зависимости

$$\bar{\sigma}_P = \frac{\sigma_P^C + \sigma_P^W}{2}. \quad (10)$$

При этом отклонения $\bar{\delta}_{\sigma_P}$ рассчитывали по формуле

$$\bar{\delta}_{\sigma_P} = \frac{\bar{\sigma}_P - \sigma_P^{\text{э}}}{\sigma_P^{\text{э}}} \cdot 100. \quad (11)$$

Модульные средние значения $\bar{\delta}_{\sigma_P}^C$ и $\bar{\delta}_{\sigma_P}^W$ вычисляли по абсолютным величинам $|\delta_{\sigma_P}^N|$ и $|\delta_{\sigma_P}^W|$ с помощью формул

$$\bar{\delta}_P^C = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_P^C|}{n}; \quad (12)$$

$$\bar{\delta}_P^W = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_P^W|}{n}, \quad (13)$$

где n - общее количество табличных значений $\bar{\delta}_{\sigma_P}^C$ и $\bar{\delta}_{\sigma_P}^W$ ($n=12$).

Зависимости величин $\delta_{\sigma_P}^C$, $\delta_{\sigma_P}^W$ и $\bar{\delta}_{\sigma_P}$ от скорости увеличения амплитуды напряжений α представлены на рисунках 1-3.

Таблиця 2

Результаты расчёта величин $\bar{\sigma}_P^{\ominus}$, σ_P^C , σ_P^W , $\delta_{\sigma_P^C}$, $\delta_{\sigma_P^W}$, $\bar{\sigma}_P$ и $\bar{\delta}_{\sigma_P}$

Тип обр.	Материал	α , Па/цикл	$\bar{\sigma}_P^{\ominus}$, МПа	σ_P^C , МПа	σ_P^W , МПа	$\delta_{\sigma_P^C}$, %	$\delta_{\sigma_P^W}$, %	$\bar{\sigma}_P$, МПа	$\bar{\delta}_{\sigma_P}$, %	
I	Сталь 45	100	299,2	293,7	297,0	-1,9	-0,8	295,3	-1,3	
		200	305,7	304,2	317,1	-0,5	3,6	310,6	1,6	
100		206,3	216,9	198,5	4,9	-3,9	207,7	0,7		
200		226,8	236,7	219,8	4,2	-3,2	228,3	0,6		
II	Сталь 45	400	245,5	258,7	249,6	5,1	1,6	254,2	3,5	
		600	262,2	272,6	272,3	3,8	3,7	272,5	3,9	
I		Сталь 40X	50	323,8	307,9	306,3	-5,2	-5,7	307,1	-5,2
			100	343,9	318,0	342,9	-8,1	-0,3	330,4	-3,9
200	353,1		328,8	340,3	-7,4	-3,8	334,5	-5,2		
50	209,3		188,3	196,1	-11,2	-6,7	192,2	-8,2		
II	Сталь 40X		100	217,9	201,0	211,1	-8,4	-3,2	206,0	-5,4
			200	238,9	215,9	232,1	-10,6	-2,9	224,0	-6,2
Средние значения						-2,9	-1,8		-2,1	
Модульные средние значения $\bar{\delta}_{\sigma_P^C}$ и $\bar{\delta}_{\sigma_P^W}$						5,9	3,3		3,8	

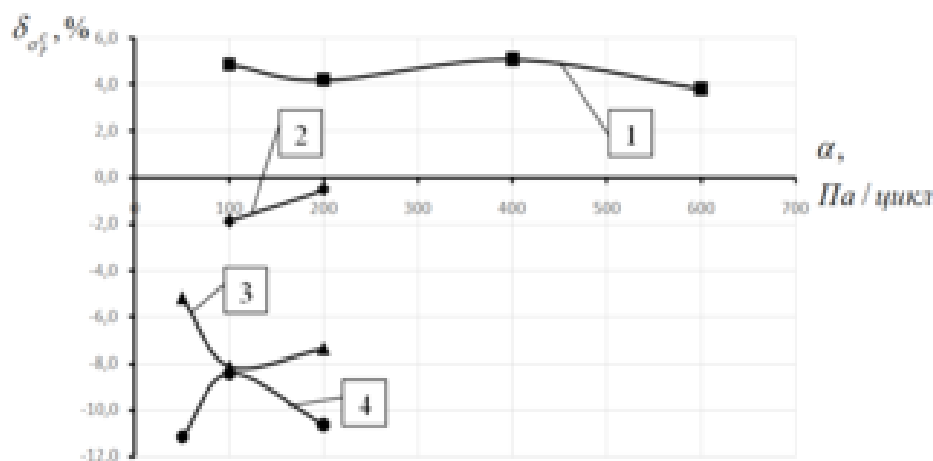


Рис. 1. Зависимость отклонений δ_{σ_P} от скорости увеличения напряжений α для степенного уравнения кривой усталости:
1 – сталь 45 образцы I типа; 2 – сталь 45 образцы IV типа;
3 – сталь 40X образцы I типа; 4 – сталь 40X образцы IV типа

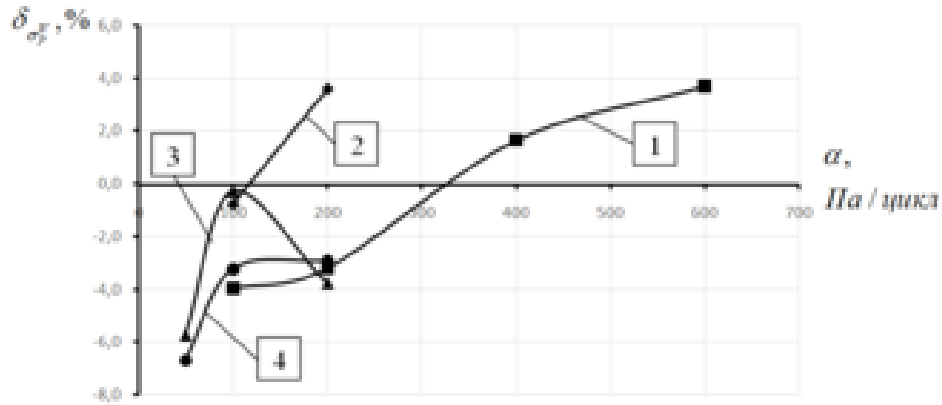


Рис. 2. Зависимость отклонений δ_{σ_p} от скорости увеличения напряжений α для уравнения кривой усталости Вейбулла:
1 – сталь 45 образцы I типа; 2 – сталь 45 образцы IV типа;
3 – сталь 40X образцы I типа; 4 – сталь 40X образцы IV типа

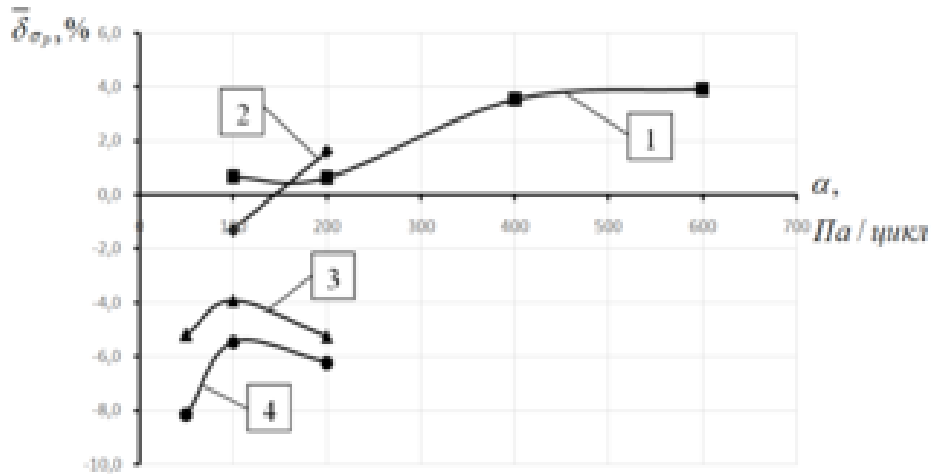


Рис. 3. Зависимость осреднённых отклонений $\bar{\delta}_{\sigma_p}$ от скорости α :
1 – сталь 45 образцы I типа; 2 – сталь 45 образцы IV типа;
3 – сталь 40X образцы I типа; 4 – сталь 40X образцы IV типа

Выводы

1. Выбор тех или иных корреляционных зависимостей между параметрами кривой усталости влияет на различие между расчётными и экспериментальными величинами разрушающих напряжений, а, следовательно, и на точность ускоренных методов, основанных на испытаниях с возрастающей нагрузкой.

2. Проведенные на примере двух уравнений кривой усталости исследования показали, что отклонения расчётных и экспериментальных значений разрушающих напряжений находятся в допустимых пределах. Так максимальные отклонения между ними составили -10,6 % (для степенного уравнения) и - 6,7 % (для уравнения Вейбулла). При этом их средние отклонения составили -2,9 % и -1,8 %, а модульные средние соответственно 5,9 % и 3,3 %. Осреднённые значения $\bar{\delta}_{\sigma_p}$ оказались промежуточными и составили соответственно -2,1 % и 3,8 %.

3. Скорость увеличения нагрузки, как видно из рисунков 2 и 3, в основном приводит к росту отклонений между расчётными и экспериментальными величинами разрушающих напряжений.

ЛІТЕРАТУРА

1. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.
2. Коноплёв А.В., Экспериментально-расчётные методы определения предела выносливости деталей машин. Создание их единой классификации: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Киев, 2013. – 40 с.
3. Олейник Н.В. Выносливость деталей машин. – К.: Техніка, 1979. – 200 с.
4. Коноплёв А.В., Селюкова Е.В. Определение предела выносливости деталей машин методом Про с учётом взаимосвязи между его параметрами // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1988. – Вып. 40. – С. 102-104.
5. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Кобаков А.Г. Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях. – Одесса: Астропринт, 2000. – 138 с.

REFERENCES

1. Oleinik N.V., Sklyar S.P. Uskorennie ispitiyaniya na ustalost' [Accelerated Fatigue Tests]. Kiev: Naukova dumka (Scientific thought), 1985. – 304 l. [in Russian].

2. Konoplev A.V. *Ekspperimentalno-raschetnie metodi opredeleniya predela vinoslivosti detalei mashin. Sozdanie ih edinoi klassifikacii [Experimental and computational methods for determining the endurance limit of machine parts. Creation of their unified classification]: Avtoref. dis...dokt. teh. nauk. (Abstract of the dissertation of doctor of technical sciences) – Kiev, 2013. - 308 l.*
3. Oleinik N.V., *Vinoslivost' detalei mashin [Endurance machine details]. – Kiev: Tehnika (Kiyiv: Technics). 1979. – 200l.*
4. Konoplev A.V., Selyukova E.V. *Opredelenie predela vinoslivosti detalei mashin metodom Pro s uchetom vzaimosvyazi meghdu ego parametrami [Determination of the endurance limit of machine parts by the Pro method, taking into account the relationship between its parameters] // Detalimashin: Respondenciya meghvedomstvennogo nauchno-tehnicheskogo sbornika (Machine details: Response to an interdepartmental scientific and technical digest). 1988. – Rel. 40. – 102-104 l.*
5. Oleinik N.V., Konoplev A.V., Kibakov A.G. *Metodi uskorenogo opredeleniya harakteristik soprotivleniya ustalosti v prakticheskikh prilozheniyah [Methods of accelerated determination of fatigue resistance characteristics in practical applications]. Odessa: Astroprint, 2000. – 138 l.*

Стаття надійшла 15.03.2021

Посилання на статтю: Коноплёв А.В., Шумило А.Н., Рожко Е.К., Галевский В.В., Кононова О.Н. Сравнительная оценка экспериментальных и расчётных значений разрушающих напряжений при испытаниях с линейно возрастающей нагрузкой // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2021. № 2(65). С. 128-137. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-2-128-137.

Article received 15.03.2021

Reference a JournalArtic: Konoplev A.V., Shumilo A.N., Rozhko E.K., Halevskiy V.V., Kononova O.N. Comparative assessment of experimental and calculated values of breaking tensions during tests with a linearly increasing load // Herald of the Odessa national maritime university, 2021. 2(65), 128-137. DOI 10.47049/ 2226-1893-2021-2-128-137.