

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140504>

УДК 629.5.021

К 68

ANALYSIS OF STRESS CONCENTRATION FACTORS OF INTERMITTENT CONNECTIONS UNDER LENGTH CHANGE OF BOUNDARY ELEMENTS

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРЕРЫВИСТЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДЛИНЫ ГРАНИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Yurii M. Korobanov

yuriy.korobanov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1017-3939

Anatolii I. Kuznietsov

anatoly@dg-ala.com

ORCID: 0000-0001-5149-3181

Alla A. Korobanova

korobanova-alla@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-2841-1659

Ю. Н. Коробанов,

д-р техн. наук;

А. И. Кузнецов,

канд. техн. наук;

А. А. Коробанова,

студ.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The investigation of stress concentration factor in the intermittent connections depending on the grid of finite elements method and boundary elements spacing in the parts of their break is carried out. The results of calculation operations by methods of finite and boundary elements in comparison with the studies of other authors are in the basis of the analysis. The difference between calculation results by method of finite elements and method of boundary elements is 1.5%–6.0%. The accurate calculation results were obtained, when the finite elements spacing was no more than 1/200 of intermittent part of the plate.

Keywords: method of finite and boundary elements; stress concentration factor; intermittent ship structures; continuous plates.

Аннотация. Приведен анализ коэффициента концентрации напряжений в прерывистых связях в зависимости от сетки метода конечных элементов и шага граничного элемента в местах их обрыва. За основу анализа приняты результаты расчетных процедур методами конечных и граничных элементов в сравнении с работами других авторов.

Ключевые слова: метод конечных и граничных элементов; коэффициент концентрации напряжений; прерывистые судовые конструкции; непрерывные пластины.

Анотація. Наведено аналіз коефіцієнта концентрації напружень у переривчатих в'язях залежно від сітки методу скінченних елементів і кроку граничного елемента в місцях їх обриву. За основу аналізу взято результати розрахункових процедур методами скінченних і граничних елементів у порівнянні з роботами інших авторів.

Ключові слова: метод скінченних і граничних елементів; коефіцієнт концентрації напружень; переривчасті судові конструкції; неперервні пластины.

REFERENCES

- [1] Sivers N.L. *Raschet i konstruirovaniye sudovykh nadstroek* [Calculation and designing of ship erections]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1966. 299 p.
- [2] Krauch S., Starfield A. *Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela* [Methods of finite elements in mechanics of rigid body]. Moscow, Mir Publ., 1987. 328 p.
- [3] Korotkin Ya.I., Rostovtsev D.M., Sivers N.L. *Prochnost korablya* [Ship strength]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1974. 432 p.
- [4] Korobanov Yu.N., Lishchuk O.M. Otsenka konstruktivnoy bezopasnosti sudov pri prochnostnykh raschetakh chislennymi metodami. Bezopasnost moreplavaniya i ee obespechenie pri proektirovani i postroyke sudov [Assessment of structural safety of ships under calculations by numerical methods. Safety of navigation and its insurance when designing and shipbuilding]. *Mat. mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* [Mathematical International Scientific and Technical Conference], 2004, pp. 39–40.
- [5] Shimanskiy Yu.A. *Proektirovaniye preryvistykh svyazey sudovogo korpusa* [Designing of intermittent connections of ship hull]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1949. 160 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В практике формирования корпусных конструкций часто встречаются связи, проходящие лишь на некотором участке их длины, либо связи, сечение которых по длине резко изменяет свой профиль. Такие связи принято называть прерывными. Примерами прерывных связей являются надстройки и рубки, балки фундаментов, местные переборки и платформы, комингсы палубных люков и пр. Учитывая многочисленность и разнообразие прерывистых судовых связей, можно отметить большой интерес к ним.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Резкое изменение сечения корпусной связи или ее обрыв приводят к перераспределению напряжений, к изменению концентрации напряжений в конструкции, а также к изменению ее конструктивной эффективности. Такая характеристика, как концентрация напряжений, описывается соответствующими коэффициентами.

В практике конструирования не принято резко изменять сечения связей или обрывать их без плавного изменения. Поэтому конструированию перехода прерывистых связей судового корпуса к непрерывным посвящено много работ [1, 4, 5]. Усилия взаимодействия мысленно расчлененных связей определяются из условия равенства деформаций по линии их сочленения.

Стремление оптимизировать прерывистые судовые конструкции ведет к определению коэффициентов концентрации напряжений. Информация о них разноречива и разбросана по многочисленным источникам. В работе [2] сопряжение прерывистой и непрерывной частей конструкции отсутствует. Это вызвано тем, что в качестве прерывной связи может быть рубка или надстройка судна.

В тех случаях, когда сочленение прерывной части с непрерывной осуществляется без какого-либо сопряжения, теоретически в этой точке могут возникать напряжения бесконечной величины. На практике такое не происходит, поскольку в точке стыковки прерывной и непрерывной частей корпуса возникает пластический узел, который и приводит к конечному значению напряжений, а следовательно, и к конечному значению коэффициента концентрации напряжений.

При использовании численных методов расчета прерывистых конструкций возникает противоречие, состоящее в том, что чем мельче шаг сетки метода конечных элементов и чем меньше размер граничного элемента, тем большим получается расчетное значение коэффициента концентрации напряжений.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – определение напряжений и коэффициентов концентрации напряжений в точке стыковки прерывной связи к непрерывной при отсутствии сопряжения между ними. В качестве объекта исследования выбрана прерывистая пластина с различной длиной прерывной части. Целью работы является определение

рациональной длины граничного элемента, способного привести к достоверным значениям коэффициентов концентрации напряжений. Оценка напряженно-деформационного состояния такой конструкции осуществляется методом конечных элементов и одним из методов граничных элементов, который описан в [3].

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В практике конструирования корпусных конструкций не принято использовать связи, концы которых резко обрываются. Однако для общего анализа напряженно-деформационного состояния конструкции, а также с целью проверки адаптации метода граничных элементов к рассматриваемой задаче целесообразно рассмотреть такой вариант. Задача сводится к расчету растягиваемой прерывной пластины, подобной приведенной в [2]. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что в сечении обрыва прерывной связи возникают пиковые напряжения, устремляющиеся в бесконечность. Дробление шага в расчетных процедурах методов конечных и граничных элементов приводит к возрастанию величины действующих напряжений. В связи с этим было подвергнуто анализу возрастание напряжений по мере дробления шага и роста относительной длины прерывной связи.

Прерывистая связь представлена со следующими характеристиками: длина прерывной части L , ее высота h , отношения между ними варьируются и представляются рядом

$$L/h = 10,0; 6,0; 5,0; 4,0; 3,0; 2,0; 1,33.$$

Ось симметрии проходит через середину длины прерывистой связи. Длина непрерывной части в расчетных процедурах принята равной $3L$, равномерно распределенная растягивающая нагрузка составляет 100 МПа. Общий вид расчетной схемы показан на рис. 1, где также приведены схемы расположения расчетных точек.

Как можно видеть из рис. 1, граничный контур прерывной связи описывается для одной симметричной части с помощью пяти отрезков (А–Б, Б–В, В–Г, Г–Д, Д–Е) – рис. 1,б. Каждый отрезок в процессе анализа будет разделен на несколько расчетных элементов (n), определяемых длиной элемента (l_e).

Кроме оценки коэффициентов концентрации напряжений, вызванных изменением сечения связи, выполняется апробация метода граничных элементов. Имеет смысл сопоставить расчетные процедуры по этому методу с определением коэффициентов концентрации напряжений методом конечных элементов.

Как можно видеть из рис. 1, граничный контур прерывной связи описывается для одной симметричной части с помощью пяти отрезков (А–Б, Б–В, В–Г, Г–Д, Д–Е) – рис. 1,б. Каждый отрезок в процессе анализа будет разделен на несколько расчетных элементов (n), определяемых длиной элемента (l_e).

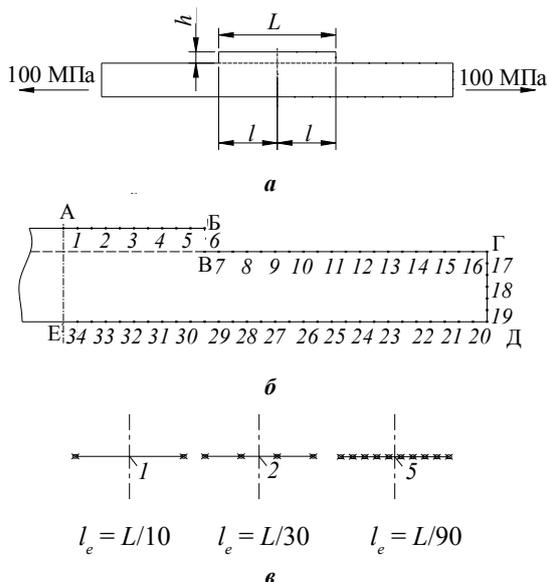


Рис. 1. Схема растяжения пластины и расположения расчетных точек: *a* – обозначения и схема нагружения; *б* – узловые точки на граничном контуре; *в* – условия изменения длины граничных элементов

Кроме оценки коэффициентов концентрации напряжений, вызванных изменением сечения связи, выполняется апробация метода граничных элементов. Имеет смысл сопоставить расчетные процедуры по этому методу с определением коэффициентов концентрации напряжений методом конечных элементов.

Такое сопоставление было проведено при $L/h = 10$ и при различных l_e . Результаты расчетных процедур приведены на рис. 2. На рис. 2,*a* показаны эпюры напряжений, полученные методом конечных элементов при таких обозначениях: $l_e = h$ (1); $l_e = L/10$ (3); $l_e = L/30$ (3); $l_e = L/90$ (4). На рис. 2,*б* приведены подобные эпюры, полученные методом граничных элементов (метод фиктивных нагрузок). Значения l_e такие же, как и при в методе конечных элементов.

Дальнейшие расчеты с целью сравнительного анализа напряженно-деформационного состояния прерывистой полосы при различных отношениях L/h выполняются методом граничных элементов при различных n и l_e . Значения n и l_e упорядочены в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1,*a* и по отдельным участкам, которые даны в табл. 1.

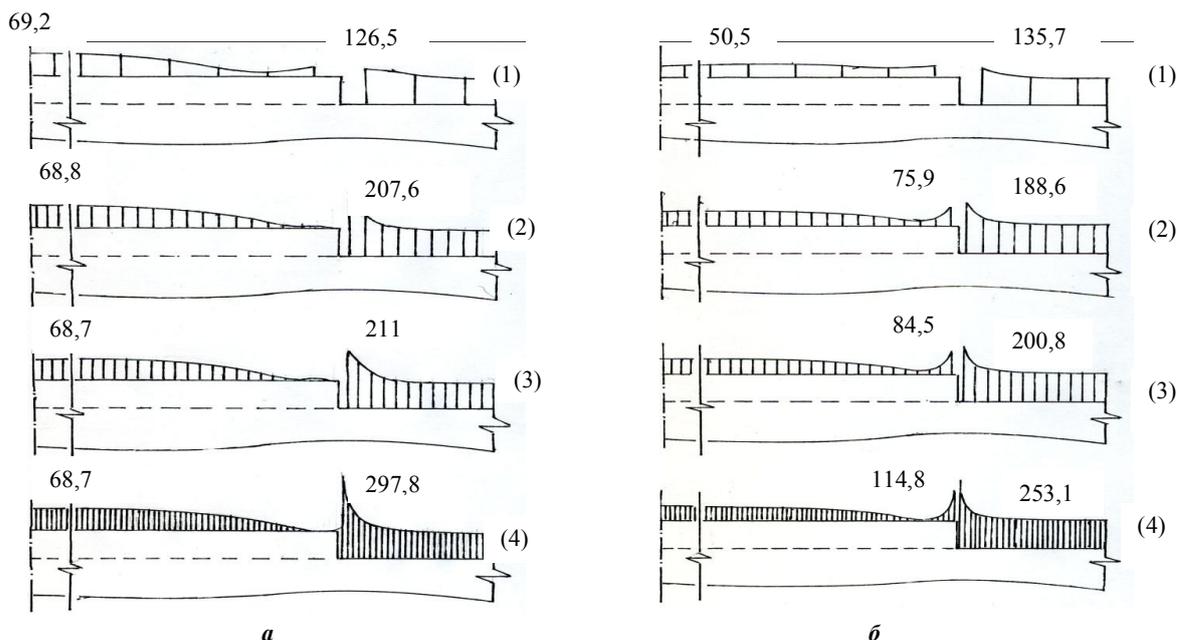


Рис. 2. Эпюры напряжений растягиваемой прерывистой полосы: *a* – полученные методом конечных элементов; *б* – методом граничных элементов

Границы участков обозначены буквами (см. рис. 1). В соответствии с разбиением на рис. 1,*в* указано количество расчетных граничных элементов (n) для отрезка.

Увеличение элементов кратно трем, тогда во всех расчетных вариантах расположение середин элементов будут совпадать (см. рис. 1,*б,в*). Это дает возможность провести сравнительный анализ полученных результатов при разной длине граничных элементов (l_e).

Таблица 1. Распределение расчетных граничных элементов

Расчет	l_e	Количество расчетных элементов n для отрезка (рис. 1, <i>a</i>)				
		А-Б	Б-В	В-Г	Г-Д	Д-Е
A0	h	2	1	5	1	5
A1	$0,1L$	5	1	10	3	15
A1-3	$0,3L$	15	3	30	9	45
A1-9	$0,9L$	45	9	90	27	135

В соответствии с принятым распределением расчетных граничных элементов были выполнены расчеты методом фиктивных нагрузок – одним из методов граничных элементов. По их результатам были построены эпюры напряжений прерывистой пластины, подвергнутой растяжению. Они соответствуют различным отношениям длины прерывной части полосы L к ее высоте h . На рис. 3 показаны полученные эпюры: рис. 3,а – $L/h = 6,0$; рис. 3,б – $L/h = 5,0$; рис. 3,в – $L/h = 4,0$; рис. 3,г – $L/h = 3,0$. Как можно видеть, каждая эпюра на рисунке имеет свой индекс. Для сравнения полученных результатов на всех эпюрах рис. 3 индексы соответствуют различной длине граничных элементов и следующим значениям: $l_e = h$ (1); $l_e = L/10$ (2); $l_e = L/30$ (3); $l_e = L/90$ (4).

Результаты расчетов при более короткой протяженности прерывной части полосы, подвергнутой растяжению, показаны на рис. 4. При расчетах был использован также метод граничных элементов. Эпюры напряжений, прерывистой пластины, подвергнутой растяжению, представлены на рис. 4,а при $L/h = 2,0$, на рис. 4,б – при $L/h = 1,33$.

Как и на ранее приведенных эпюрах, можно видеть свой индекс. Для сопоставимости полученных результатов на всех эпюрах рис. 4 индексы характеризуют протяженность граничных элементов. Каждый индекс соответствует следующим значениям длины граничных элементов: $l_e = h$ (1); $l_e = L/10$ (2); $l_e = L/30$ (3); $l_e = L/90$ (4).

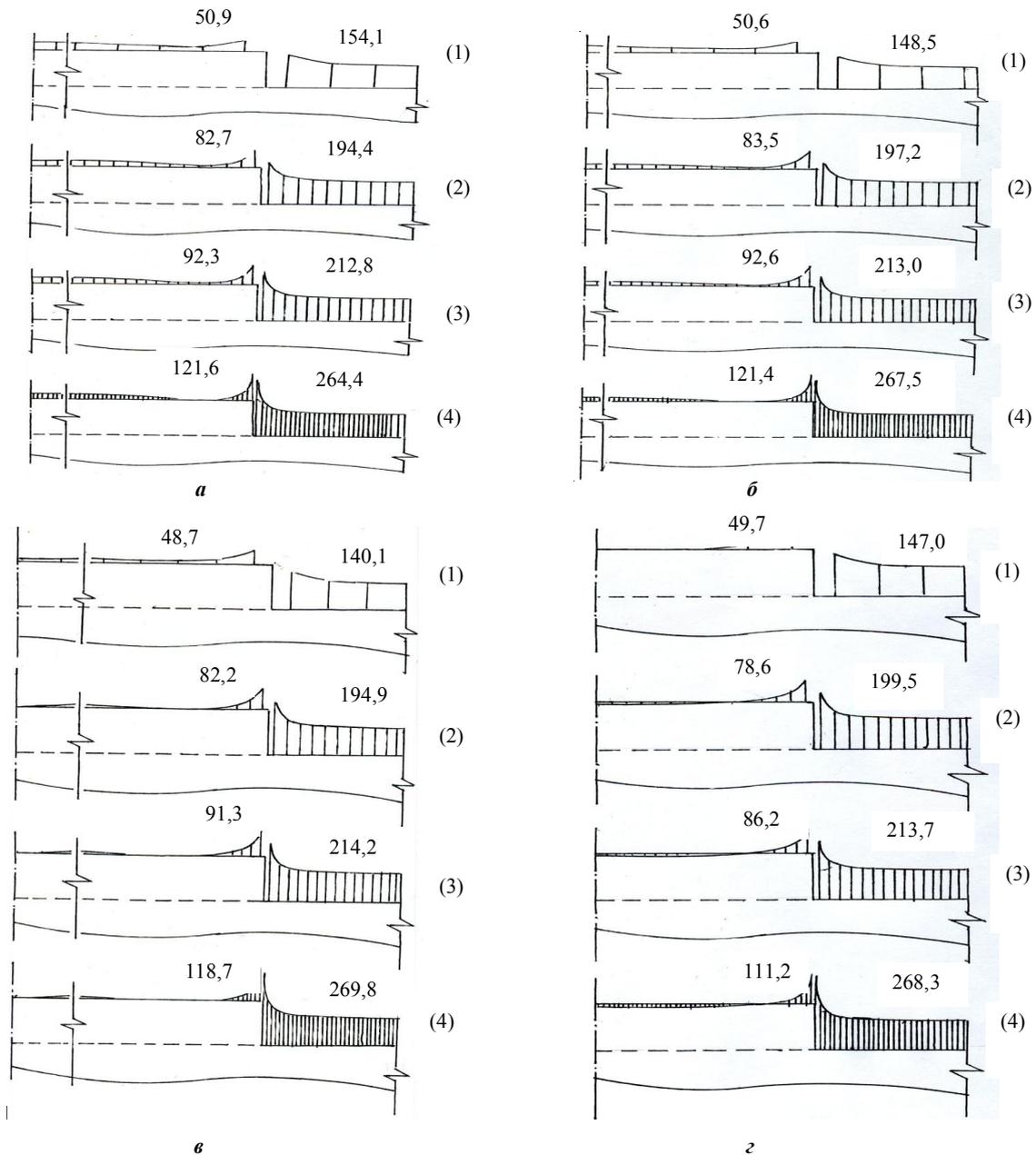


Рис. 3. Эпюры напряжений прерывистой полосы, подвергнутой растяжению, полученные методом граничных элементов: а – $L/h = 6,0$; б – $L/h = 5,0$; в – $L/h = 4,0$; г – $L/h = 3,0$

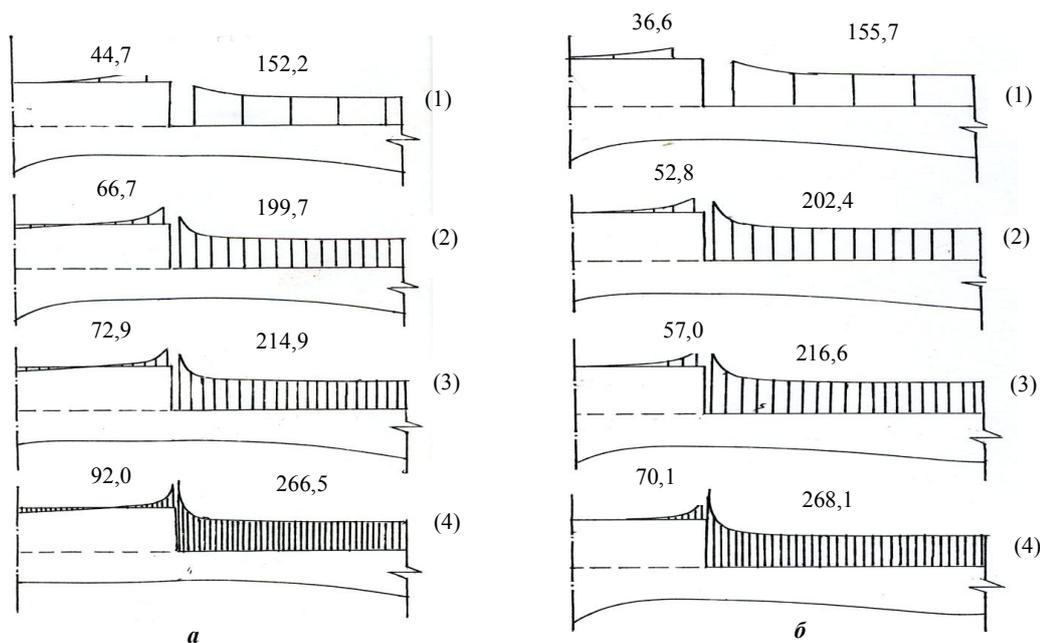


Рис. 4. Эпюры напряжений прерывистой полосы, подвергнутой растяжению, полученные методом граничных элементов: *a* – $L/h = 2,0$; *б* – $L/h = 1,33$

Как видно, все представленные эпюры проиллюстрированы цифровыми значениями. Они установлены в наиболее характерных точках прерывистой полосы. Указанные цифры отвечают наибольшему напряжению в этих точках. Поскольку пластины подвергнуты растяжению интенсивностью 100 МПа, эти же цифры являются косвенным отображением коэффициентов концентрации напряжений в этих точках.

ВЫВОДЫ

1. Анализ прерывистых связей в виде пластин с различной протяженностью прерывной части, подвергнутой растяжению, показал отсутствие сопряжения между прерывной и непрерывной частями пластины.

2. Апробация метода граничных элементов (метод фиктивных нагрузок) выполнена на процедуре сравнения двух прерывистых пластин с одинаковой геометрией прерывной части конструкции с резуль-

татами расчета методом конечных элементов. Сходимость результатов составила от 1,5 до 6 %.

3. При различной длине граничных элементов коэффициенты концентрации напряжений возрастают примерно в 1,6–1,8 раза. Протяженность прерывной части на коэффициенты концентрации напряжений практически не влияет. В районе стыковки прерывистой и непрерывной частей коэффициенты концентрации напряжений приближаются к $\kappa = 3,0$.

4. Достоверные значения коэффициентов концентрации напряжений можно ожидать, если длина граничного элемента будет принята не более $1/200$ длины прерывной части.

5. Уточнение рассмотренной задачи может быть выполнено на основе линейной механики разрушений с анализом возможного пластического шарнира в районе стыковки прерывного и непрерывного участков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Коробанов, Ю. Н.** Оценка конструктивной безопасности судов при прочностных расчетах численными методами [Текст] / Ю. Н. Коробанов, О. М. Лишук // Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов : матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Николаев, 2004. – С. 39–40.
- [2] **Короткин, Я. И.** Прочность корабля [Текст] / Я. И. Короткин, Д. М. Ростовцев, Н. Л. Сиверс. – Л. : Судостроение, 1974. – 432 с.
- [3] **Крауч, С.** Методы граничных элементов в механике твердого тела [Текст] / С. Крауч, А. Старфилд. – М. : Мир, 1987. – 328 с.
- [4] **Сиверс, Н. Л.** Расчет и конструирование судовых надстроек [Текст] / Н. Л. Сиверс. – Л., 1966. – 299 с.
- [5] **Шиманский, Ю. А.** Проектирование прерывистых связей судового корпуса [Текст] / Ю. А. Шиманский. – Л. : Судпромгиз, 1949. – 316 с.

© Ю. М. Коробанов, А. И. Кузнецов, А. А. Коробанова
Надійшла до редколегії 18.07.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Л. І. Коростильов