

УДК: 629.5.02:624.042

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В.Н. Тряскин*, Л.А. Князев*, А.Ю. Дудаль**

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Россия, 190008, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, E-mail:office@smtu.ru

** Bureau Veritas, France, 92571, Neuilly-sur-Seine, boulevard du Chateau, 67/71;
E-mail: alexey.dudal@bureauveritas.com

В работе предложена методика оценки параметров ледовой нагрузки при взаимодействии корпуса судна с ледяным образованием. Предполагается, что при натурных испытаниях деформации/напряжения замеряются тензодатчиками в ограниченном числе точек рассматриваемого бортового перекрытия, расположенных на поясах шпангоутов. Метод воспроизведения основывается на решении многопараметрической оптимизационной задачи. Целевая функция и ограничения формируются с использованием аппарата планирования эксперимента.

локальные ледовые нагрузки, бортовые конструкции корпуса судна, гидродинамическая модель взаимодействия, планирование эксперимента, тензодатчики

ВВЕДЕНИЕ

Задача воспроизведения параметров ледовой нагрузки может возникать при обработке результатов натурального эксперимента. Известно, что конструкции корпуса при эксплуатации судна в ледовых условиях работают в основном в упругой стадии. Предельные нагрузки, приводящие к повреждениям, носят случайный разовый характер [1]. Поэтому для оценки ледовых воздействий в натурном эксперименте могут использоваться тензодатчики, которые измеряют линейные упругие деформации элементов конструкции при внешних воздействиях. Существующие методы тарирования датчиков позволяют установить соответствие между деформациями и напряжениями. Параметры действующей ледовой нагрузки при этом обычно остаются неизвестными. Для их оценки применяют различные методы, обеспечивающие воспроизведение значений этих параметров с той или иной степенью достоверности (см., например, [2]).

МЕТОДИКА

Предлагаемая методика воспроизведения значений параметров ледовой нагрузки по результатам натурального эксперимента основана на постановке проблемы в виде задачи математического программирования [3] разыскиваются значения составляющих вектора варьируемых переменных

$$\mathbf{X} = x_i^T, i = 1, \dots, k. \quad (1)$$

Из условия минимизации целевой функции $GF \mathbf{X}$ при ограничениях в виде равенств и/или неравенств

$$h_j \mathbf{X} = 0, j = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$$g_j \mathbf{X} \geq 0, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

и граничных условиях

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}. \quad (4)$$

Предлагается использовать программное обеспечение для решения задачи нелинейного программирования общего вида.

Применительно к задаче воспроизведения ледовой нагрузки в качестве независимо варьируемых следует принять пять параметров ($k=5$):

- координаты центра пятна приложения нагрузки $x_1 = X_c, x_2 = Z_c$;
- высоту и длину зоны контакта со льдом $x_3 = b_s, x_4 = l_s$;
- давление в зоне контакта $x_5 = p_0$.

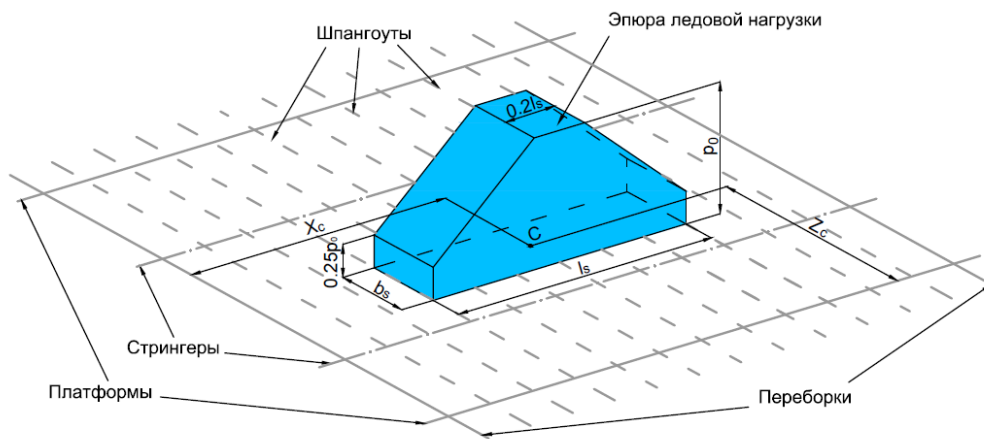


Рис. 1. Схема воздействия ледовой нагрузки на борт судна

Fig. 1. Local ice load acting on ship hull

Целевую функцию предлагается принять в виде

$$GF \mathbf{X} = \sum_{u=1}^{ns} \sigma_u - \hat{\sigma}_u \mathbf{X}^2, \quad (5)$$

где σ_u – результаты оценки напряжений в точке расположения u -го датчика по замерным деформациям (ns – число точек, в которых установлены датчики); $\hat{\sigma}_u \mathbf{X}$ – значения напряжений в точках установки датчиков, определяемые по результатам расчетов конструкции на действие локальной ледовой нагрузки, при значениях варьируемых параметров, определяемых текущим вектором $\mathbf{X} = x_i^T, i = 1, \dots, k$ в итерационном цикле поисковой процедуры.

Целевая функция не может быть представлена в аналитическом виде. Для определения ее значений необходимо привлекать специализированное или универсальное программное обеспечение. Возможно представление целевой функции в виде регрессионной зависимости, используя для этого аппарат планирования эксперимента [4].

Эпюра ледовой нагрузки, на которую выполняется расчет конструкции, может быть принята в виде, вытекающем из гидродинамической модели

взаимодействия корпуса судна со льдом [5] (см. рис. 1). При этом $x_5 = p_0$ – максимальные давления в середине зоны контакта. Для упрощения задачи эпюра может быть принята в форме параллелепипеда. В данном случае $x_5 = p_0$ – это средние давления в зоне контакта.

Наиболее просто реализовать процедуру определения напряжений в заданной точке перекрытия с использованием программного обеспечения, основанного на стержневой идеализации конструкции и концепции присоединенного пояса для стержней – балок набора. Такой программный модуль может запускаться в итерационной поисковой процедуре каждый раз, когда выполняется расчет значения целевой функции. Время расчета составляет долю секунды или, по крайней мере, очень небольшое. Условность модели конструкции и расчетной эпюры ледовой нагрузки обуславливает некоторую погрешность получаемых значений напряжений. Значения параметров ледовой нагрузки также получаются условными, характеризующимися определенной степенью достоверности.

При использовании программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов в пластинчатой или пластинчато-стержневой идеализации конструкции, возможность включения его в итерационную процедуру исключается по техническим возможностям. В данных условиях зависимости отклика конструкции в местах расположения датчиков могут быть построены методом моделирования на основе аппарата планирования эксперимента. На степень достоверности оценки параметров ледовой нагрузки здесь будет также влиять точность предсказания откликов конструкции и определения целевой функции регрессионными зависимостями. Аппарат планирования эксперимента может быть использован и в первом случае – при стержневой идеализации конструкции.

В работе [4] адекватность регрессионных моделей предложено оценивать на основе сопоставления значений, полученных из численного эксперимента с моделью конструкции, и значений, предсказываемых уравнением регрессии. В частности, для задач проектирования корпусных конструкций это расхождение требуется принимать не более 2,5-5,0%. Учитывая значительную условность определяемых ледовых нагрузок и вероятностный их характер, для оценки адекватности регрессионной модели в задаче воспроизведения ледовых нагрузок можно принимать уровень расхождения 10-20%.

При больших размерах факторного пространства – больших интервалах варьирования переменных и значительной нелинейности функций отклика – возникает проблема построения адекватных регрессионных моделей с применением аппарата планирования эксперимента. Для ее решения необходимо повышать порядок полиномов – регрессионных зависимостей. Это приведет к увеличению количества численных экспериментов. Существует вероятность, что усложнение вида поверхности отклика за счет повышения степени полинома окажется бесполезным. Более эффективным может быть подход, основанный на планировании эксперимента для построения кусочно-гладкой аппроксимации поверхности отклика, усложняя ее аналитический вид только в подобласти сильных выбросов результатов эксперимента и производя сшивание поверхностей

[6]. В ряде случаев оказывается эффективным логарифмическое преобразование значений функции отклика [4]:

$$\tilde{y}_u = \exp \left\{ b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_{iu} + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{j>i} b_{ij} x_{iu} x_{ju} + \sum_{m>j>i} b_{ijm} x_{iu} x_{ju} x_{mu} + \dots \right\}. \quad (6)$$

Применение целевой функции в виде (5) – достаточно жесткое условие воспроизведения значений параметров ледовой нагрузки. Степень жесткости возрастает с увеличением количества одновременно анализируемых откликов (количества датчиков).

Задача может быть дополнена ограничениями равенствами или неравенствами, в основу которых положены физические представления или геометрические допущения. Так, если предполагается, что удар корпуса происходит о скругленную кромку льда, то может быть учтено геометрическое условие, связывающее длину и высоту зоны контакта [7]:

$$h_{\mathbf{X}} = x_4 - 1.6 \cdot \sqrt{2R \cdot x_3 \cdot \sin \beta_{x_1, x_2}} = 0, \quad (7)$$

где R – радиус скругления кромки льдины; β_{x_1, x_2} – угол наклона борта к вертикали в точке контакта со льдом, который является функцией координат центра зоны контакта x_1 и x_2 .

Если в процессе тензометрических испытаний в режиме реального времени контролируется толщина ледяного покрова H , то должно быть введено ограничение-неравенство, определяющее предельную величину высоты зоны контакта при смятии льда на всю толщину:

$$g_{\mathbf{X}} = H - x_3 \cdot \cos \beta_{x_1, x_2} \geq 0. \quad (8)$$

Граничные условия (4) определяются положениями: расчетной осадки судна, конструкции по длине, участка установки датчиков и т.п. Они устанавливают область допустимых значений варьируемых параметров.

При движении в сплошном ледяном поле нагрузки на корпус судна несут существенные. Они не представляют практического интереса, но приводят к наличию шумового поля. Обработке результатов натуральных замеров должны подвергаться нагрузки, вызывающие напряжения больше некоторого порогового значения – явно выделяющиеся пиковые значения на экспериментальной кривой. Такие нагрузки обычно действуют на корпус судна, например, при ударе о кромку канала или плавающую льдину при значительной скорости его движения. Пороговое значение (например, вызывающее напряжения больше 10% предела текучести – $0.1R_{cH}$) может быть установлено при обработке эксперимента.

Некоторые положения предложенной методики иллюстрируются ниже. Рассматривается бортовая конструкция условного судна в носовом районе корпуса. Конструкция имеет поперечную систему набора. Она представляется в виде стержневой системы. Решается задача о моделировании откликов системы в районе расположения датчиков. Предполагается, что датчики установлены на поясах основных шпангоутов. Они регистрируют линейные деформации растяжения-сжатия поясков или соответствующие нормальные напряжения.

Расчетные нормальные напряжения определяются по формуле:

$$\hat{\sigma}_u \mathbf{X} = \frac{M_u \mathbf{X}}{W} = \frac{k_{Mu} \cdot Q \cdot l}{W} = \frac{k_{Mu} x_1, \dots, x_4 \cdot x_5 \cdot x_3 \cdot a \cdot l}{W}, \quad (9)$$

где $M_u \mathbf{X} = k_{Mu} \cdot Q \cdot l$ – расчетный изгибающий момент в точке установки u -го датчика; $k_{Mu} x_1, \dots, x_4$ – безразмерный коэффициент расчетного изгибающего момента в точке установки u -го датчика; a – расстояние между шпангоутами; l – расчетный пролет шпангоута; $Q = x_5 \cdot x_3 \cdot a$ – условная нагрузка, относительно которой обезразмеривается изгибающий момент; W – момент сопротивления поперечного сечения шпангоута на уровне свободного пояска.

В связи с тем, что расчеты конструкций выполняются в упругой области, напряжения в балках набора линейно связаны с величиной давления, т. е. коэффициенты момента не зависят от величины давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Конструкция бортового перекрытия судна в районе ледового пояса имеет поперечную систему набора безрамных шпангоутов с разносящими стрингерами. Основные и промежуточные шпангоуты – балки из сварного таврового профиля со свободным пояском 100x30 и стенкой 380x16. Размеры присоединенного пояска 380x24. Бортовые стрингеры имеют аналогичные размеры. Рассматриваемый участок конструкции ограничен справа и слева поперечными переборками, а сверху и снизу – платформами. Стрингеры и шпангоуты считаются жесткозаделанными в опорных сечениях.

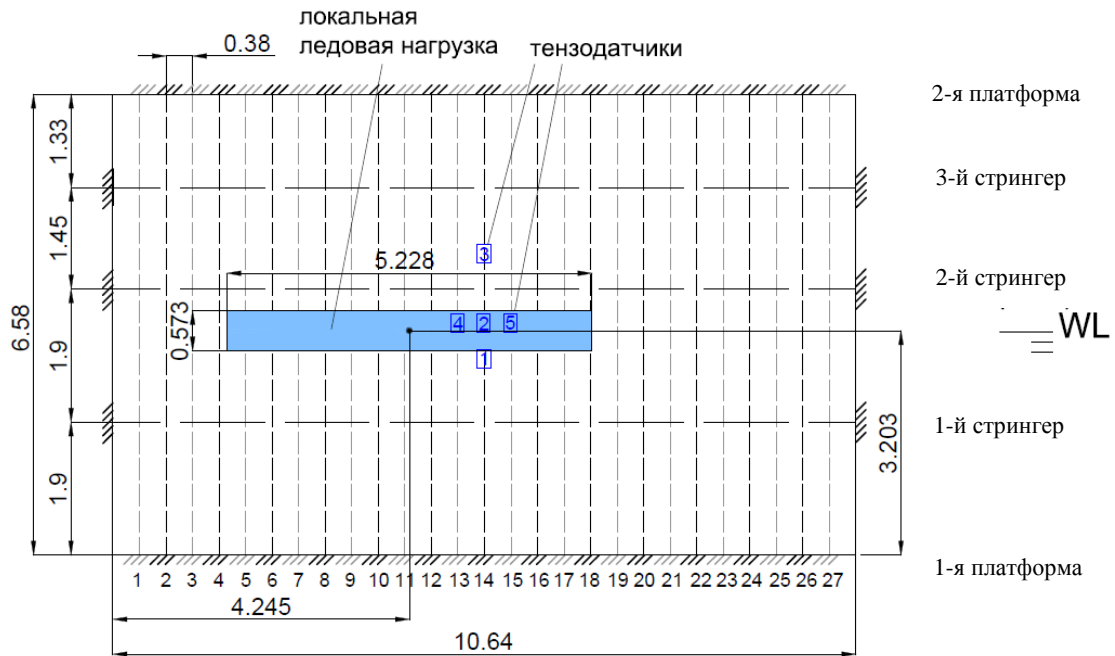


Рис. 2. Расчетная модель бортового перекрытия
Fig. 2. Scheme of considered hull structure

Для выполнения численного эксперимента использовалось программное обеспечение расчета бортовых перекрытий при действии локальной ледовой нагрузки, разработанное на кафедре конструкции судов СПбГМТУ [7]. Алгоритм программного обеспечения основан на стержневой идеализации конструкции. Для раскрытия статической неопределенности использован метод приравнивания прогибов, учитывалось влияние деформаций сдвига.

На основе серии расчетов внутренних усилий при различных параметрах ледовой нагрузки были построены квадратичные регрессионные зависимости коэффициентов изгибающих моментов от параметров X_c , Z_c , b_s и l_s в виде:

$$k_{Mu} \mathbf{X} = b_0 + \sum b_i x_{iu} + \sum b_{ii} x_{iu}^2 + \sum b_{ij} x_{iu} x_{ju} . \quad (10)$$

Для их построения использовался аппарат планирования эксперимента.

Коэффициенты изгибающих моментов оценивались в пяти точках конструкции, указанных на рис. 2. Предполагалось, что в этих точках установлены тензометрические датчики на поясах балок основного набора. Для обеспечения адекватности регрессионных моделей диапазоны варьирования параметров ледовой нагрузки X_c , Z_c , b_s , l_s были приняты относительно небольшими (табл. 1). Границы области изменения параметра p_0 выбраны таким образом, чтобы под действием ледовой нагрузки максимальные напряжения в конструкции изменялись в пределах

$$0.25R_{eH} \leq \sigma_{\max} \leq 0.75R_{eH} , \quad (11)$$

где $R_{eH} = 315 \text{ МПа}$ – предел текучести материала балок.

Таблица 1. Диапазоны изменения параметров ледовой нагрузки
Table 1. Ice load parameters ranges

Параметр	b_s (м)	l_s (м)	X_c (м)	Z_c (м)	p_0 (МПа)
Минимальное значение	0.50	4.56	3.80	3.13	3.12
Максимальное значение	1.00	9.12	6.84	3.63	9.36

С использованием выведенных регрессионных зависимостей $k_{Mu} \mathbf{X}$ в соответствии с формулой (5) была построена целевая функция.

Результаты замеров моделировались точными значениями напряжений σ_u в точках 1 – 5, определяемыми с использованием предложенного программного обеспечения. Они рассчитывались при следующих значениях параметров ледовой нагрузки: $b_s = 0.573$ м; $l_s = 5.228$ м; $X_c = 4.245$ м; $Z_c = 3.203$ м; $p_0 = 5.590$ МПа и составляли соответственно: $\sigma_1 = 109.49$ МПа; $\sigma_2 = 141.08$ МПа; $\sigma_3 = 95.04$ МПа; $\sigma_4 = 157.01$ МПа; $\sigma_5 = 122.04$ МПа. Результаты воспроизведения параметров ледовой нагрузки представлены в табл. 2. Полученные значения воспроизведенных параметров показывают хорошую работоспособность описанной методики.

Таблица 2. Исходные и воспроизведенные значения параметров ледовой нагрузки
 Table 2. Initial and recovered values of ice load parameters

Параметр	b_s (м)	l_s (м)	X_c (м)	Z_c (м)	p_0 (МПа)
Исходный вариант	0.573	5.228	4.245	3.203	5.590
Результаты воспроизведения	0.622	5.277	3.958	3.231	5.487
Погрешность (%)	7.89	0.94	7.25	0.85	1.84

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика воспроизведения параметров ледовой нагрузки по результатам тензометрических испытаний показывает принципиальную возможность решения этой задачи.

Для повышения степени достоверности полученных результатов необходимо учесть ряд факторов, которые придают задаче вероятностную постановку. В частности, момент сопротивления поперечного сечения должен определяться с учетом статистических свойств износа балок набора и наружной обшивки (присоединенного пояска) и параметров поперечного сечения профиля, обусловленных технологическими допусками на производство листового или профильного проката. Геометрические параметры кромки льда, входящие в ограничения (7) и (8), также будут случайными величинами.

Отсюда следует, что поставленная задача может быть решена методом имитационного моделирования. Параметры, значения которых точно не известны, могут моделироваться с использованием датчиков случайных чисел. При этом на выходе получатся некоторые статистические законы распределения параметров ледовых нагрузок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lindberg, K. Performance of Icebreaker YMER on the Swedish Arctic Expedition "YMER 80" – Appendix No 1 – Strain Measurements and Hull Damages. //Proc. of the 6th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions (POAC'81), Vol. 3, Québec, Canada, 1981, p. 1154–1173.
2. Timofeev, O., Egorov B., Klenov A., Krupina N. Measurements of ice loads onboard icebreaker "Kapitan Dranitsyn" during ARCDEV – expedition. //Proc. of the 15th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions (POAC'99), Vol. 2, Espoo, Finland, 1999, p. 747–756.
3. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
4. Тряскин, В.Н. Применение аппарата планирования эксперимента в САПР корпусных конструкций / В.Н. Тряскин // Проблемы проектирования конструкций судов: сб. науч. тр. / ЛКИ. – Л., 1990. – С. 41-50.
5. Курдюмов, В.А. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед / В.А. Курдюмов, Д.Е. Хейсин // Прикладная механика. – Л.: ААНИИ, 1976. – Т. XII. – №10. – С. 103-109.
6. Федоров, В.В. Кусочно-гладкая аппроксимация поверхностей отклика. Новые идеи в планировании эксперимента / В.В. Федоров; под ред. В.В. Налимова. – М.: Наука, 1969.

7. Курдюмов, В.А. Анализ работы бортовых перекрытий транспортных судов под действием ледовой нагрузки / В.А. Курдюмов, В.Н. Тряскин // Ледопроеходимость и ледовая прочность морских судов: сб. науч. тр. / ЛКИ. – Л., 1979.

DETERMINATION OF ICE LOAD PARAMETERS USING STRAIN GAGE MEASUREMENTS

V.N. Tryaskin, L.A. Kniazev, A.Y. Dudal

The present work proposes a method for recovery of ice load and determination of real location of a contact zone. Deflection/stresses in structure are supposed to be measured by strain gages fitted on flanges of frames in several points of a side grillage. The method is based on solution of a multiparametric optimization problem. A goal function and constraints are determined with the use of experimental design method.

local ice loads, ship hull side structures, hydrodynamic model of interaction, experimental design, strain gages

2-я платформа

WL

