

К ВОПРОСУ О КОРРЕКТИРОВКЕ ДАННЫХ ХОДОВЫХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУДОВ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

д-р техн. наук К.Е. САЗОНОВ

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: kirsaz@rambler.ru

В работе обсуждены методы корректировки данных натурных испытаний судов в сплошных ровных льдах, которые проводятся с целью подтверждения их спецификационных характеристик. Основное внимание уделено методом пересчета данных натурального эксперимента в случае, когда характеристики ледяного покрова по толщине льда и его прочности на изгиб не совпадают с указанными в спецификации параметрами. Приведены формулы, которые позволяют выполнить построение кривой ледопроеходимости судна по данным натурального эксперимента, а также выполнить пересчет полученных характеристик для других значений прочности льда на изгиб.

Ключевые слова: натурные испытания, толщина льда, ледовая ходкость, прочность льда на изгиб, ледовое сопротивление, мощность, скорость движения.

ВВЕДЕНИЕ

Натурные испытания являются завершающим этапом довольно длительного процесса проектирования и строительства судна, который должен подтвердить выполнение, в первую очередь, ходовых качеств, предъявляемых спецификацией. При формировании требований к показателям ледовой ходкости в техническом задании на проектирование ледокола или судна ледового плавания обычно указывают требуемую предельную ледопроежимость и/или скорость движения в ровных льдах заданной толщины и прочности. Возможность достижения указанных показателей в процессе проектирования проверяется путем проведения модельных испытаний в ледовых бассейнах, а также выполнения соответствующих расчетов. Правильность всех принятых проектных решений может быть подтверждена только на основании анализа данных натурных испытаний.

В литературе по морской ледотехнике способы проведения и методика обработки результатов натурных испытаний судов во льдах практически не отражены. Можно указать монографию А.Я.Рывлина и Д.Е.Хейсина (Рывлин, Хейсин, 1980), формально посвященную указанному вопросу, однако она в основном посвящена рассмотрению теоретических вопросов плавания судов во льдах, а методика проведения натурных испытаний отражена в ней явно недостаточно. В указанном вопросе не могут оказать существенную помощь и рекомендации Ледового комитета МКОБ (ИТТС, 1999), в которых не приводится никакой методики обработки данных натурального эксперимента. Разрозненная информация содержится в статьях и докладах, посвященных натурным испытаниям судов (Апполонов, 2011; Крупина, 2013; Wilkman, 2007; Belyashov, 2008).

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВО ЛЬДАХ

Особенностью ходовых натурных испытаний ледоколов и судов ледового плавания является практическая невозможность провести эти испытания, точно соблюдая все требования спецификации. В первую очередь это касается подтверждения требований по предельной ледопроходимости. У проектируемых и строящихся в настоящее время ледоколов (Добродеев, 2015), а также у многих крупнотоннажных судов ледового плавания (Цой, 2013) предельная ледопроходимость лежит в пределах от 2 до 4 м. Найти подходящий для проведения испытаний полигон с ровным льдом такой толщины обычно не представляется возможным. Поэтому натурные испытания обычно проводятся в максимально толстых льдах, которые можно найти в районе их проведения.

Требование по достижению ледоколом или судном заданной скорости во льдах заданной толщины удовлетворить более просто, но и при этом обычно толщина льда очень редко точно совпадает с заданной. Эти особенности требуют разработки специальных методов коррекции данных натурального эксперимента по толщине льда для обеспечения возможности сравнения полученных результатов со спецификационными требованиями.

Еще одной трудностью при обработке данных натурных испытаний ледоколов и судов ледового плавания является несовпадение прочностных свойств льда на изгиб с заданными значениями. Обычно для арктических ледоколов и судов в техническом задании и спецификации указывается некоторое стандартное значение прочности льда на изгиб, равное 500 кПа. На полигонах, подходящих для проведения испытаний, значение прочности льда на изгиб может существенно отличаться от приведенных значений. Поэтому возникает необходимость корректировки полученных данных для учета влияния прочности льда на показатели ледовой ходкости.

При проведении ледовых натурных испытаний имеется еще один фактор, который может повлиять на полученные результаты. Речь идет о наличии снежного покрова на поверхности льда. Методика учета этого фактора требует отдельного рассмотрения, поэтому в данной работе принято, что влияние снежного покрова уже учтено и требуется внести корректировку только на влияние толщины и прочности льда.

Важнейшим моментом при обработке результатов ледовых натурных испытаний является введение в экспериментальные данные корректирующих поправок, которые учитывают отклонение реальных характеристик ледовой среды от заданных в спецификации. Аналогичные поправки вводятся и при обработке данных модельного эксперимента в ледовых бассейнах (ИТТС, 2002; Jochmann, 2014). Тем не менее прямое использование хорошо апробированной системы поправок для ледового бассейна невозможно в натурном эксперименте. Это связано с тем, что в модельном эксперименте производится непосредственное измерение ледового сопротивления судна, в натурном же эксперименте измерить ледовое сопротивление не представляется возможным. В ходе натурального эксперимента измерения осуществляются в координатах «мощность» – «скорость». При таком подходе сопоставление данных модельного и натурального экспериментов можно проводить, только сопоставляя модельную и натурную «кривые ледопроходимости», т.е. зависимости $V = f(h)$, где V — скорость судна во льдах, h — толщина льда.

КОРРЕКТИРОВКА ДАННЫХ ПО ТОЛЩИНЕ ЛЬДА

Обычно при проведении натурных испытаний удается провести эксперименты не более чем в двух отличающихся по толщине ледяных полях. При этом движение

судна происходит передним или задним ходом при изменяющемся уровне мощности главных механизмов. В результате при постоянной толщине льда получают набор точек, характеризующихся постоянным значением мощности и скорости движения. При обработке таких данных возникает задача определить ту толщину льда, при которой могло бы двигаться судно с зарегистрированной скоростью при использовании полной мощности энергетической установки. Эта задача решается с помощью скейлинговых соотношений, отражающих самоподобие физических процессов, происходящих при движении судна в сплошном льду (Сазонов, 2010).

Рассмотрим основные скейлинговые соотношения, применяемые в ледовой ходкости. Одним из важнейших является соотношение между ледовым сопротивлением R_l и мощностью судна N . Оно задается следующей формулой:

$$R_l \sim N^{2/3}. \quad (1)$$

Это соотношение является справедливым не только в ледовой ходкости судов, но и в ходкости судов на чистой воде. Оно вытекает из рассмотрения основных законов работы двигателей. Основным недостатком указанной формулы является возможность ее применения только для режимов, близких к швартовному, т.е. при скоростях хода, не превышающих 1 м/с. Именно этому режиму соответствует показатель степени в формуле (1), равный 2/3.

Другим основным соотношением ледовой ходкости судов является степенная зависимость ледового сопротивления от толщины преодолеваемого судном льда, полученная эмпирическим путем:

$$R_l \sim h_l^k, \quad (2)$$

где показатель степени $1 \leq k < 2$ зависит от формы корпуса судна и скорости его движения и, возможно, от прочностных свойств льда.

При проведении модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне показатель степени k формально можно рассчитать по следующей формуле:

$$k = \frac{\ln(R_{l1} / R_{l2})}{\ln(h_{l1} / h_{l2})}, \quad (3)$$

где R_{l1} , R_{l2} — два значения ледового сопротивления модели при постоянной скорости движения $v = \text{const}$; h_{l1} , h_{l2} — соответствующие указанным значениям ледового сопротивления толщины льда. В работе (Сазонов, 2016) показано, что формула (3) может использоваться только при совпадении прочностных свойств моделированных ледяных полей, применение этой формулы при существенно различающихся показателях прочности льда приводит к значительной ошибке. На практике часто используется среднее значение показателя степени $k = 1,5$, как показано в упомянутой выше работе, при совпадении прочностных свойств льда и относительно небольших отклонениях толщин ошибка в выборе не приводит к существенным погрешностям итогового результата. Необходимо отметить, что формулы (2) и (3) применяются при постоянном значении скорости движения модели судна.

Соотношения (2) и (3) широко применяются в практике работы ледовых бассейнов для приведения экспериментальных данных к единым значениям толщины льда.

Совместное использование соотношений (1) и (2) позволяет получать другие скейлинговые формулы, например, определить зависимость толщины преодолеваемого судном ровного льда от его мощности:

$$h_l \sim N^{2/3k}. \quad (4)$$

С помощью формулы (4) формально можно по данным натурного эксперимента определить значение показателя степени k для натурного судна при скоростях движения меньших 1 м/с:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{\ln(N_1 / N_2)}{\ln(h_{11} / h_{12})}, \quad (5)$$

где N_1, N_2 — два измеренных при проведении натурных испытаний значения мощности, потребляемой судном при постоянной скорости движения во льдах различной толщины; h_{11}, h_{12} — соответствующие указанным значениям мощности толщины льда. Однако погрешности определения в натурных условиях средних значений мощности и толщины льда таковы, что реально использовать формулу (5) не представляется возможным.

Применение соотношения (4) в некоторых случаях позволяет получать на кривой ледопроходимости дополнительные точки, соответствующие максимальной мощности. Такая возможность возникает, когда в ледяном поле, в котором проводятся испытания при движении судна на режиме использования полной мощности, зарегистрированы относительно высокие скорости движения — 3–4 узла. Тогда при снижении мощности энергетической установки, например на 20 %, в этих же условиях можно попытаться зарегистрировать устойчивую скорость менее 1 м/с. Так как условия проведения испытаний можно считать идентичными, в первую очередь по прочностным свойствам льда, то, не внося больших погрешностей, можно принять $k = 1,5$ и выполнить расчет по формуле (4). По-видимому, при планировании проведения натурных испытаний необходимо предусматривать возможность выполнения указанных режимов движения.

Описанный выше подход в принципе может быть применен и для более высоких скоростей движения судна во льдах. Необходимым условием для этого является предварительный гидромеханический расчет ходовых и тяговых характеристик судна при малых (до 5–6 узлов) скоростях хода. При таких скоростях движения традиционная тейлоровская схема расчета ходкости не всегда может быть применена. Корректнее выполнять этот расчет по швартовной схеме, разработанной в Крыловском государственном научном центре (Каневский, 2011а, б). Расчет по этой схеме позволяет получить значения показателя степени в формуле (1) не только на швартовном режиме (2/3), но и при наличии скорости движения, а также учесть особенности движительного комплекса.

КОРРЕКТИРОВКА ДАННЫХ ПО ПРОЧНОСТИ ЛЬДА

В российской практике внесение поправок на отклонение прочности льда на изгиб от заданного значения осуществляется путем корректировки экспериментально полученной в ходе проведения натурных испытаний кривой ледопроходимости. Для внесения поправок используются приведенные выше скейлинговые соотношения (1) – (4), а также формула, применяемая при обработке данных модельного эксперимента и рекомендованная Ледовым комитетом МКОБ (ИТТС, 2002; Jochmann, 2014):

$$R_l = (1 - a) R_{l, \text{means}} + a \frac{\sigma_{f, \text{target}}}{\sigma_{f, \text{means}}} R_{l, \text{means}}. \quad (6)$$

Здесь величина a показывает, какую часть от ледового сопротивления составляют усилия, зависящие от прочности льда на изгиб; means — измеренное значение величины; target — требуемое значение величины.

Пусть в ходе проведения натурных испытаний получены значения скорости хода V судна в толщине льда h . При этом измеренная прочность льда на изгиб $\sigma_{f, means}$ отличается в ту или иную сторону от требуемого значения $\sigma_{f, target}$. Задача ставится следующим образом: определить толщину льда, в которой судно будет двигаться с той же скоростью, если прочность льда на изгиб станет равной $\sigma_{f, target}$ вместо $\sigma_{f, means}$. Из этого следует, что необходимо определить такую толщину льда с новым значением прочности на изгиб, в которой ледовое сопротивление судна будет такое же, как и при проведении натурных испытаний (это следует из условия постоянства скоростей). Другими словами, необходимо найти такое изменение толщины льда, которое вызывает такое же изменение ледового сопротивления, что и поправка на прочность.

Пусть при некоторой неизвестной толщине льда h_x при постоянной скорости V и прочности льда $\sigma_{f, means}$ судно имеет ледовое сопротивление R_x . Тогда в соответствии с формулой (6) при значении прочности льда $\sigma_{f, target}$ оно будет иметь сопротивление R'_x :

$$R'_x = (1-a)R_x + a \frac{\sigma_{f, target}}{\sigma_{f, means}} R_x = R_x \left[(1-a) + a \frac{\sigma_{f, target}}{\sigma_{f, means}} \right]. \quad (7)$$

Тогда отношение этих сопротивлений будет равно

$$\frac{R'_x}{R_x} = (1-a) + a \frac{\sigma_{f, target}}{\sigma_{f, means}}. \quad (8)$$

В соответствии со сказанным выше, неизвестная величина выбиралась таким образом, чтобы сопротивление R'_x было равно ледовому сопротивлению судна при проведении натурных испытаний. Поэтому это значение должно соответствовать значению толщины льда h , которое было зафиксировано в натурных испытаниях. Соотношение сопротивлений связано с толщинами льда соотношением (2):

$$\frac{R'_x}{R_x} = \left(\frac{h}{h_x} \right)^k. \quad (9)$$

Окончательно с использованием выражения (8) можно получить формулу для определения искомой толщины льда

$$h_x = h \left(1 / (1-a) + a \frac{\sigma_{f, target}}{\sigma_{f, means}} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (10)$$

Использование формулы (10) позволяет проводить пересчет натурной кривой ледопроеходимости на другие значения прочности льда. Пример такого пересчета приведен на рис. 1 цвет. вклейки для одного из существующих ныне ледоколов. Натурные значения на этом рисунке соответствуют прочности льда на изгиб, равной 500 кПа.

Основным недостатком приведенных выше выражений является необходимость знания параметров a и k . К сожалению, в настоящее время их определение только на основании данных, полученных в ходе выполнения натурального эксперимента, невозможно. Здесь необходимо привлекать результаты модельного эксперимента, при обработке которых можно получить указанные значения (Сазонов, 2016). Анализ условий подобию показывает, что эти параметры должны быть идентичны в модельных и натурных условиях.

ВЫВОДЫ

В работе предложены подходы к корректировке данных натурных испытаний ледоколов и судов ледового плавания. Показано, что в настоящий момент невозможно корректно обработать данные натурного эксперимента, не привлекая результаты, полученные ледовых бассейнах при проведении модельных испытаний. Поэтому часто встречающуюся ситуацию, при которой натурные испытания проводятся специалистами, не имеющими доступа ко всему объему модельных гидродинамических и ледовых испытаний, следует считать неприемлемой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Апполонов Е.М., Беляшов В.А., Сазонов К.Е., Скрябин Д.С., Игошин Е.В.* Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море // Судостроение. 2011. № 4. С. 9–12.
- Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е.* Современные подходы к обеспечению навигации крупнотоннажных судов во льдах // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 4 (59). С. 26–29.
- Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербаков И.В.* Швартовая система коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59 (343). С. 77–88.
- Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербаков И.В.* Расчет тяговых характеристик многовального судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59 (343). С. 89–100.
- Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В.* Оценка ледовой ходкости НЭС «Академик Трёшников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 57–64.
- Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е.* Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 208 с.
- Сазонов К.Е.* Скейлинговые соотношения в ледовой ходкости судов // Морской вестник. 2010. № 3 (35). С. 104–105.
- Сазонов К.Е.* Обоснование методов коррекции результатов модельных экспериментов по определению ледового сопротивления судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 92 (376). С. 93–108.
- Цой Л.Г., Андрияшин А.В., Штрек А.А.* Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 46–56.
- Belyashov V.A., Sazonov K.E., Tumashik F.P., Grozdov F.V.* “Yury Topchev” and “Vladislav Strizhov” multipurpose ice-breaking vessels for Prirazlomnaya platform maintenance: field and model tests // International Conference and Exhibition on Performance of Ship and Structures in Ice 2008, ICETECH 2008. P. 105–113.
- Jochmann P., Lau M., Sazonov K.E. et al.* Specialist Committee on Ice. Final Report and Recommendations to the 27th ITTC // Proc. of the 27th International Towing Tank Conference. Denmark, Copenhagen. 2014. Vol. II. P. 726–747.
- ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Full Scale Measurements, Ice Testing Ship Trials in Ice. 7.5–04–03–01. 1999. 8 p.
- ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Testing and Extrapolation Methods Ice Testing Resistance Test in Level Ice. 7.5–02–04–02.1. 2002. 7 p.
- Wilkman G., Elo M., Lönnberg L., Kunnari J.* Ice trials of MV Norilskiy Nickel in march 2006 // Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions. POAC-07, Dalian, China, June 27–30, 2007. P. 405–417.

**ON CORRECTION OF FULL-SCALE TEST DATA OBTAINED
DURING SEA TRIALS IN ICE CONDITIONS**

The paper discusses methods for correction of full-scale ship test data obtained in continuous level ice during sea trials, which are conducted to verify ship specification performance. The focus is on the methods used for extrapolation of full-scale test data when the actual ice thickness and bending strength parameters do not match the specification criteria. Formulas are given to plot the ship speed- ice thickness curve based on full-scale test data as well as to extrapolate the obtained characteristics to other ice bending strength conditions.

Keywords: sea trials, propulsion in ice, ice bending strength, ice resistance, power, ship speed.

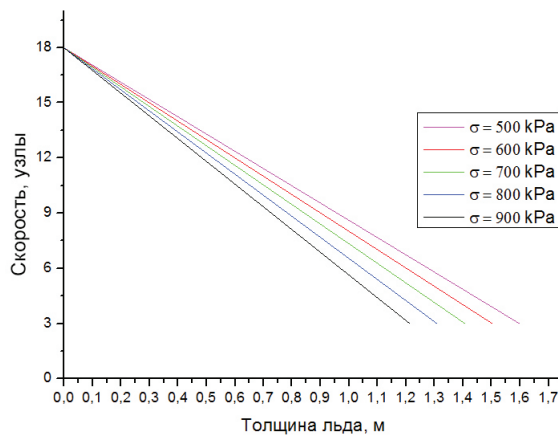


Рис. 1. Пересчет натурной кривой ледопроходимости на другие значения прочности льда на изгиб.