

Лобанов Василий Алексеевич

Lobanov Vasily Alekseevich

Волжская государственная академия водного транспорта (Нижний Новгород)

Volga State Academy of Water Transport (Nizhniy Novgorod)

доцент кафедры Судовождения и безопасности судоходства

The Safety of Navigation and Shipping department – associate professor

кандидат технических наук

Candidate of technical sciences

Доцент / Associate professor

E-Mail: lobbas@mail.ru

05.22.19 Эксплуатация водного транспорта, судовождение

Ледовая ходкость сухогруза смешанного плавания

Ice propulsion ability of river-sea dry-cargo vessel

Аннотация: В работе приведены результаты численного моделирования с помощью CAE-систем ледовой ходкости сухогруза смешанного плавания с полноповоротными винторулевыми колонками. Выявлен характер ледового сопротивления судна в различных условиях плавания. Показано, что расчётная ледовая категория судна не соответствует установленному ледовому классу, что повышает риск ледовой аварийности данного проекта. Проведён сравнительный анализ результатов конечноэлементного моделирования с аналогичными данными полуэмпирических методик. Отмечена неадекватность последних при оценках ледовой ходкости судов с нетрадиционными характеристиками. Сделаны выводы о применимости CAE-систем при разработке нормативных документов, регламентирующих ледовое плавание судов.

The Abstract: In the paper the results of numerical modeling with the help of CAE-systems of the ice propulsion ability of river-sea dry-cargo vessel with azimuthal pod drive. Revealed the nature of the ice resistance of a vessel in a variety of sailing conditions. It is shown that the estimated ice category of the vessel does not meet government ice class, which increases the risk of ice accidents of this project. The comparative analysis of the results of finite element modeling with similar data of semiempirical methods. Noted the inadequacy of the past in estimates of ice propulsion ability of vessels with non-traditional parameters. Conclusions are made about the applicability of CAE-systems in developing normative documents regulating the ice navigation of vessels.

Ключевые слова: Судно, ледовые качества, ледовая ходкость, конечноэлементное моделирование, CAE-системы.

Keywords: Vessel, ice Performances, ice propulsion ability, finite element modeling, CAE-systems.

Введение

За последние годы для отечественного флота внутреннего и смешанного река-море плавания построено несколько новых серий судов, имеющих в обозначении класса символ ледовой категории. Российские классификационные общества присваивают судну ледовый класс, руководствуясь критерием прочности корпусных конструкций и элементов движительно-рулевого комплекса (ДРК), регламентируя допустимые ледовые условия и

режимы эксплуатации. Однако набор ледовых качеств судна, связанных с обеспечением его безопасности, не ограничивается ледовой прочностью. Поэтому судам, участвующим в ледовых транспортных операциях, рекомендуется иметь специальный регламентирующий документ - Свидетельство о допустимых условиях ледового плавания судна [9]. Свидетельство, выдаваемое по заявке судовладельца, призвано конкретизировать весь комплекс основных ледовых качеств судна и уточнить условия его безопасной ледовой эксплуатации. В первую очередь это относится к другому принципиально важному ледовому качеству, характеризующему достижимые режимы эксплуатации судна – ледовой ходкости.

Особенностью конструктивных решений применительно к названному флоту является использование в ряде проектов удлинённых цилиндрических вставок (более 70% расчётной длины судна), новых типов ДПК (полноповоротные винторулевые колонки) увеличенной мощности (до 1200 кВт). В частности, это относится к исследуемому сухогрузу смешанного река-море плавания проекта RSD 44. Такие технические решения можно признать нетрадиционными, что предполагает особенности движения в битых льдах. Эти особенности не в полной мере учитываются нормативными и классическими полуэмпирическими методиками при расчётах кривых ледовой ходкости подобных судов. Поэтому согласно правилам Российских Регистров оценки их ледовых качеств являются предметом специального рассмотрения.

В общем случае самым надёжным приёмом такого рассмотрения являются натурные ледовые испытания судна. Однако для современного судовладельца эта процедура неприемлема по причинам экономического характера (слишком высока вероятность получения судном ледовых повреждений с последующим выводом из эксплуатации и дорогостоящим восстановительным ремонтом). Другим источником получения сравнительно достоверной информации о ледовых качествах принято считать модельный эксперимент. Но полномасштабность его осуществима разве что в современных, оснащённых передовым оборудованием НПО или КБ. Если учесть, что таковых насчитывается единицы, то следует ожидать заведомо неприемлемых условий для большинства судовладельцев. Поэтому для решения экспертных ледовых проблем в настоящее время начинает практиковаться использование САЕ-систем.

САЕ-системы – это программные комплексы, реализующие численные решения в задачах механики твёрдых тел и различных сред. Трудоёмкость описания и относительная длительность решения задач в большой степени окупается высокой адекватностью, наглядностью, детализацией рассматриваемых процессов. В общем случае САЕ-системы – это инструмент, обеспечивающий оптимальное соотношение затрат судовладельца на проведение анализа ледовых качеств судов с достоверностью получаемых результатов.

Численный эксперимент

В ряду используемых САЕ-систем предпочтение отдано программному комплексу LS-DYNA [11]. Выбор данного продукта обусловлен его универсальностью, хотя изначально он разрабатывался для анализа быстротекущих процессов. Уже первые попытки адаптировать эту систему для решения задач безопасности ледового судоходства показали обнадеживающие результаты. Дальнейшее её применение позволило уточнить реологию используемых материалов, алгоритмы контактных взаимодействий тел, формулировки конечных элементов, что существенно повысило адекватность моделей. LS-DYNA объединяет в себе три автономные структурные единицы: препроцессор, процессор и постпроцессор. Препроцессор предназначен для разработки геометрии модели, её конечноэлементного разбиения, выбора и задания свойств материалов, типов элементов, контактных алгоритмов, методов расчёта, вывода содержания и объёмов информации для последующей постпроцессорной обработки.

Процессор-транслятор выполняет непосредственный расчёт. Основное его достоинство – реализация параллельных вычислений на многопроцессорных (многоядерных) комплексах. Для этого существует несколько версий процессора. Так, современные многоядерные компьютеры успешно работают с версией SMP (shared memory parallel).

Возможности постпроцессорной обработки данных и, в частности, визуализация результатов моделирования являются принципиально значимыми элементами САЕ-систем. Постпроцессор LS-DYNA располагает богатым набором средств анализа модели: масштабирование, детализация, инструменты для измерений, градиентные поля параметров, уровни, изолинии, следы, сечения, разрезы, векторы, графический процессор, анимация. Применительно к численным экспериментам по оценке основных ледовых качеств судов использование этих инструментов позволяет вводить обоснованные критерии безопасности, корректировать традиционные аналитические методы или определять границы их применимости.

С целью минимизации затрат времени на расчёты численный эксперимент был реализован в упрощённой постановке с учётом рекомендаций работ [3, 6] (Рис. 1). При этом трёхмерная модель описывала геометрию только судна и ледяного поля. Воздействие воды как третьей контактной среды описывалось узловыми силами на поверхности корпуса судна и ледяном покрове. Эквивалентом действия движительно-рулевого комплекса также являлись узловые силы, зависящие от параметров движения судна.

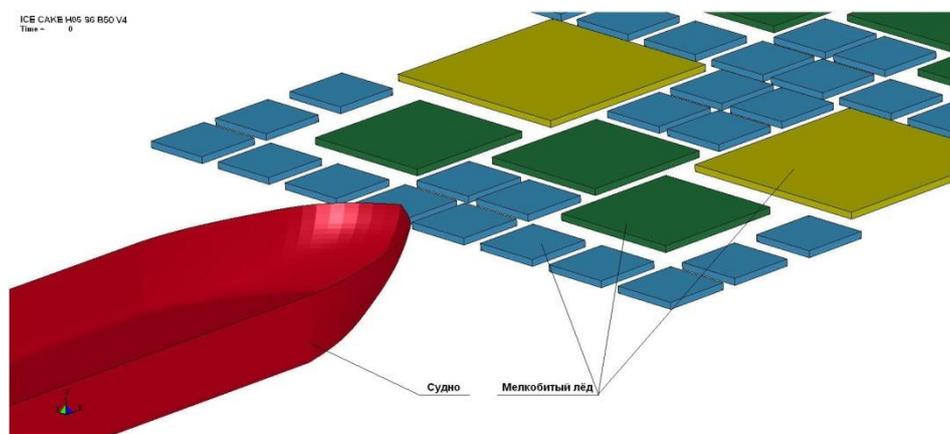


Рис. 1. Исходная модель при расчётах ледовой ходкости сухогруза пр. RSD 44

Кривая буксировочного сопротивления для осадки в полном грузу 3,6 м (линия 2 на рис. 2) была получена в результате предварительного САЕ-моделирования разгона судна в условиях чистой воды. Кривая упора двигателей (линия 1 на рис. 2) принята на основе анализа сдаточных испытаний теплохода [7] и швартовных характеристик используемых на данном проекте полноповоротных винторулевых колонок [12]. Гидродинамика ледяного покрова оценивалась в соответствии со СНИПом [10].

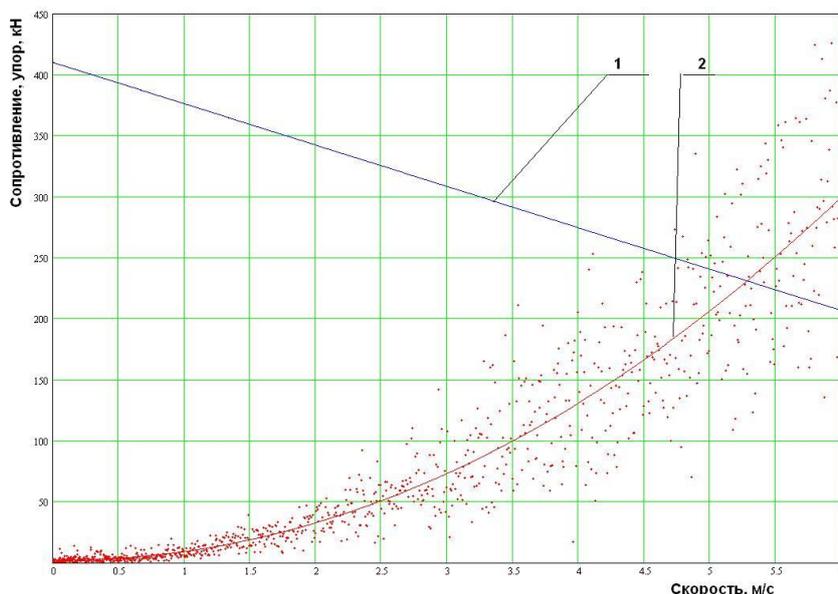


Рис. 2. Тяговая и буксировочная характеристики сухогруза пр. RSD 44

При моделировании варьировалась толщина льда (0,1 – 0,6 м), его сплочённость (6 – 10 баллов), раздробленность (тёртый лёд – мелкобитый лёд), относительная ширина (1,5 – 3,5) и длина (6 – 7) ледового канала. Численный эксперимент сопровождался анализом характера движения судна в канале (рис. 3а), обтекания льдом его носовой оконечности (рис. 3б, в) и обязательным мониторингом скорости хода (Рис. 4).

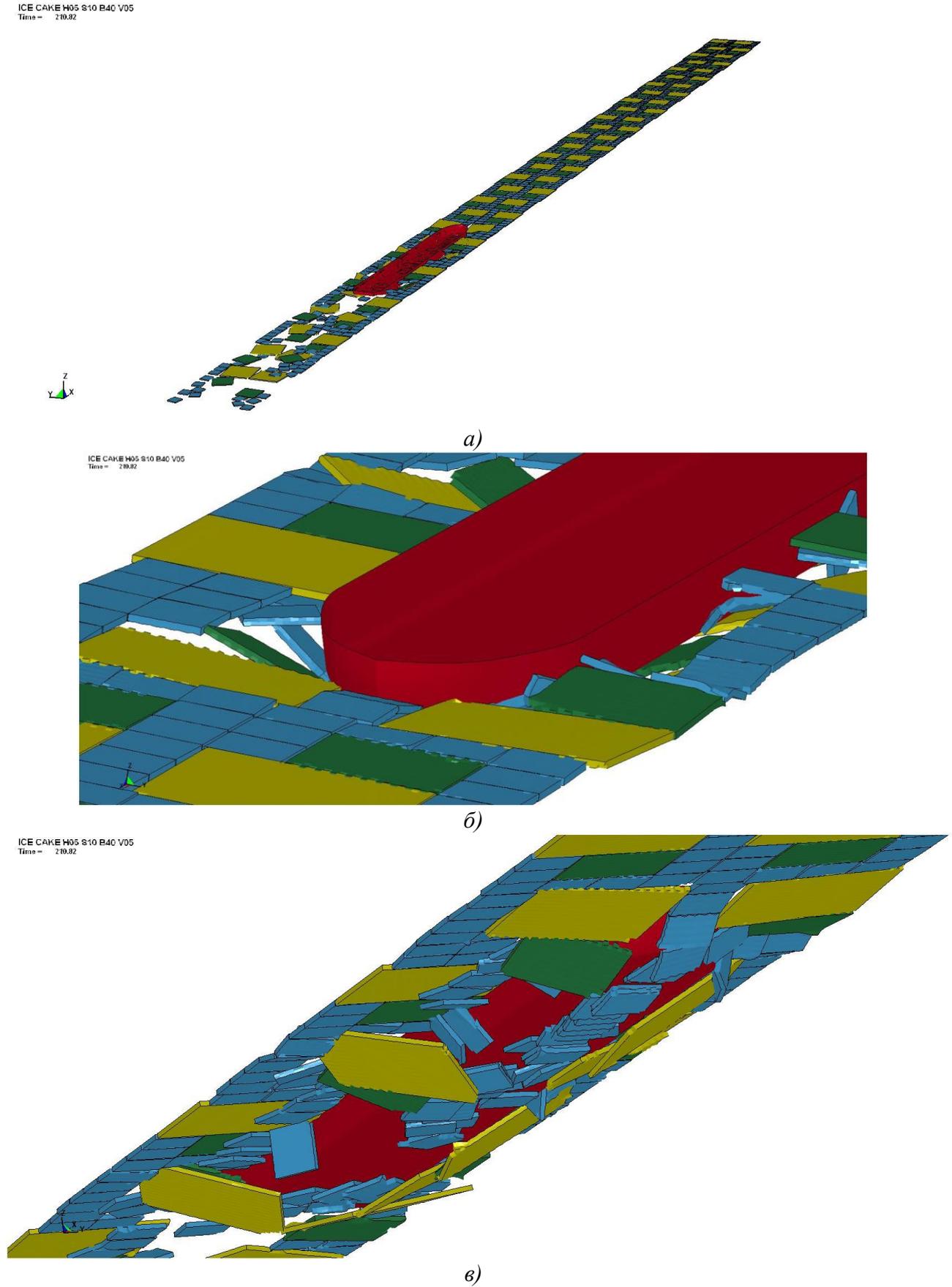


Рис. 3. Характер движения сухогруза пр. RSD 44 в мелкобитых льдах

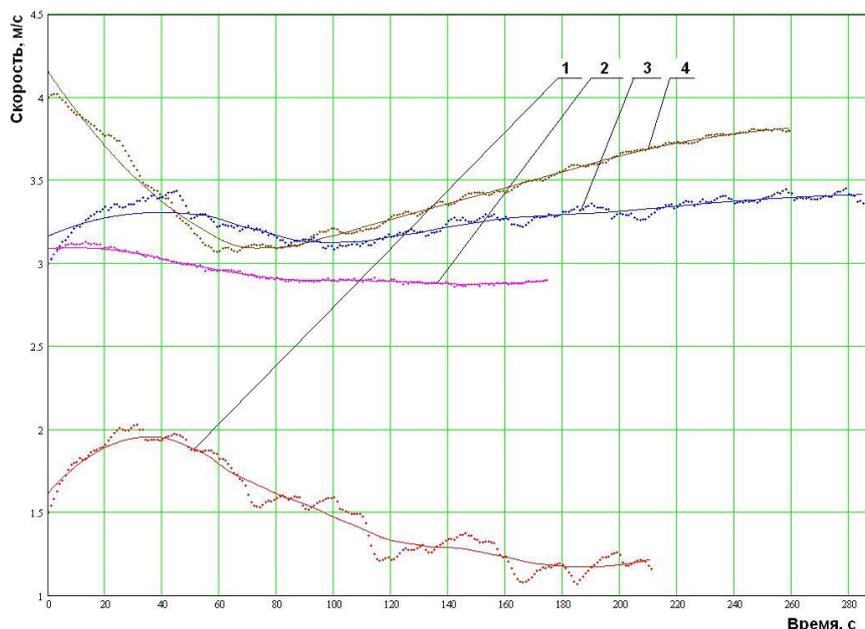


Рис. 4. Временные зависимости скорости хода сухогруза пр. RSD 44 в ледовом канале
(1 – мелкобитый лёд толщиной 0,5 м сплочённостью 9-10 баллов;
2 – тёртый лёд толщиной 0,5 м сплочённостью 9-10 баллов;
3 - мелкобитый лёд толщиной 0,5 м сплочённостью 6-7 баллов;
4 - мелкобитый лёд толщиной 0,2 м сплочённостью 9-10 баллов)

Начальная скорость движения в каждом варианте ледовых условий назначалась из экспертных предположений о ходовых возможностях судна. Расчёт прекращался при наступлении относительной стабилизации сглаженной кривой скорости (Рис. 4). Период стабилизации колебался в пределах 3 – 5 мин. Полученное значение скорости принималось в качестве статистической точки для данных ледовых условий.

Таким образом, было смоделировано 10 вариантов, описывающих ходкость судна в «рабочем» диапазоне ледовых условий. По экспертной оценке полученная выборка признана репрезентативной для сравнительного анализа с аналогичными результатами полуэмпирических или нормативных методик расчёта ледовой ходкости.

Сравнительный анализ результатов

Качественный разбор характера движения не выявил каких-либо особенностей взаимодействия судна данного проекта со льдами, плавание в которых разрешено правилами Регистров. Даже при максимальной осадке процесс взаимодействия корпуса с мелкобитыми и тёртыми льдами сводится не только к их уплотнению и раздвиганию, но и устойчивому притапливанию. Судно хорошо пропускает лёд «через себя» (Рис. 3в), что способствует снижению ледового сопротивления.

Тем не менее, количественный анализ продольных ледовых корпусных нагрузок показал, что при их меньшем среднем уровне (например, в сравнении с однотипными танкерами пр. RST 27 и 19614, рис. 5), временная неравномерность ледового сопротивления остаётся значительной. В первую очередь это свойственно движению в сплочённых и сильносплочённых льдах. Необходимо отметить, что в таком характере контакта судна с ледяным покровом «остаётся» место проявлению «ледовых ударов» [4]. В подтверждение этого на рис. 6 показаны кривые продольных ледовых нагрузок (В – расчётная, А – сглаженные

значения) при движении сухогруза в мелкобитых льдах толщиной 0,5 м и сплочённостью 9-10 баллов.

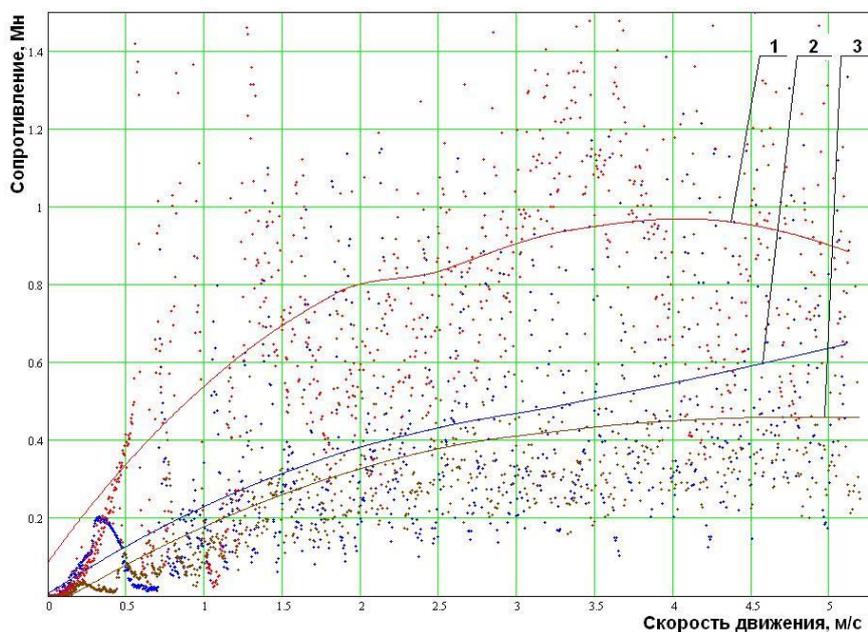


Рис. 5. Чистое ледовое сопротивление судов в канале, заполненном сильносплочёнными мелкобитыми льдами толщиной 0,5 м
(1 – танкер проекта RST27; 2 – танкер проекта 19614; 3 – сухогруз проекта RSD44)

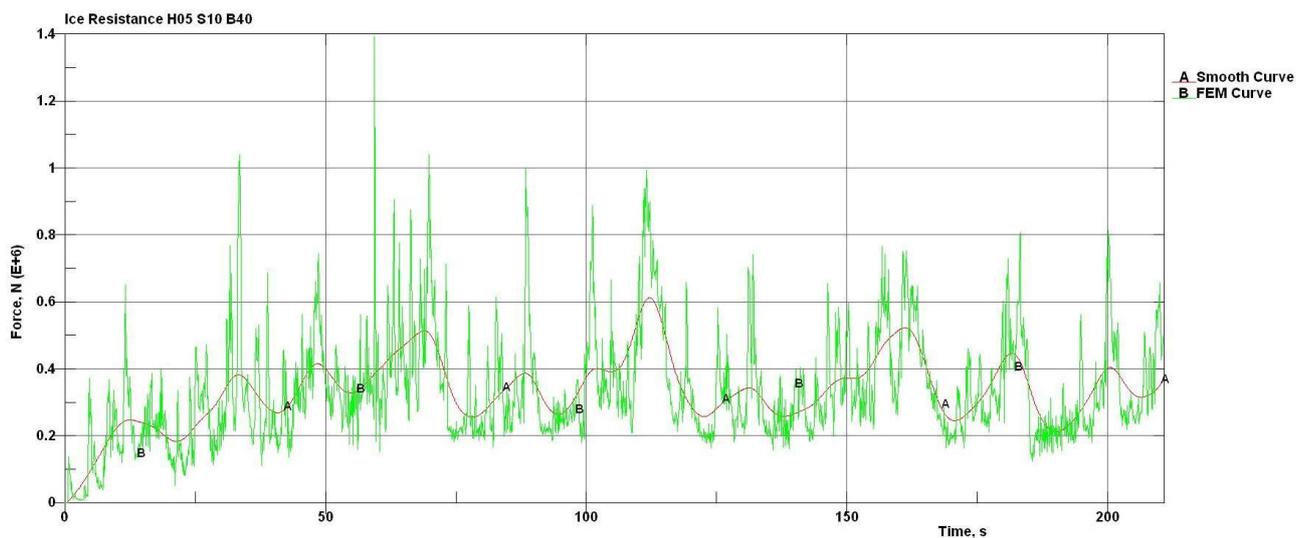


Рис. 6. Временная зависимость ледового сопротивления сухогруза пр. RSD 44 в мелкобитых льдах

Исследование влияния ширины канала на уровень ледового сопротивления судна не выявило значимой корреляции этих характеристик (Рис. 7).

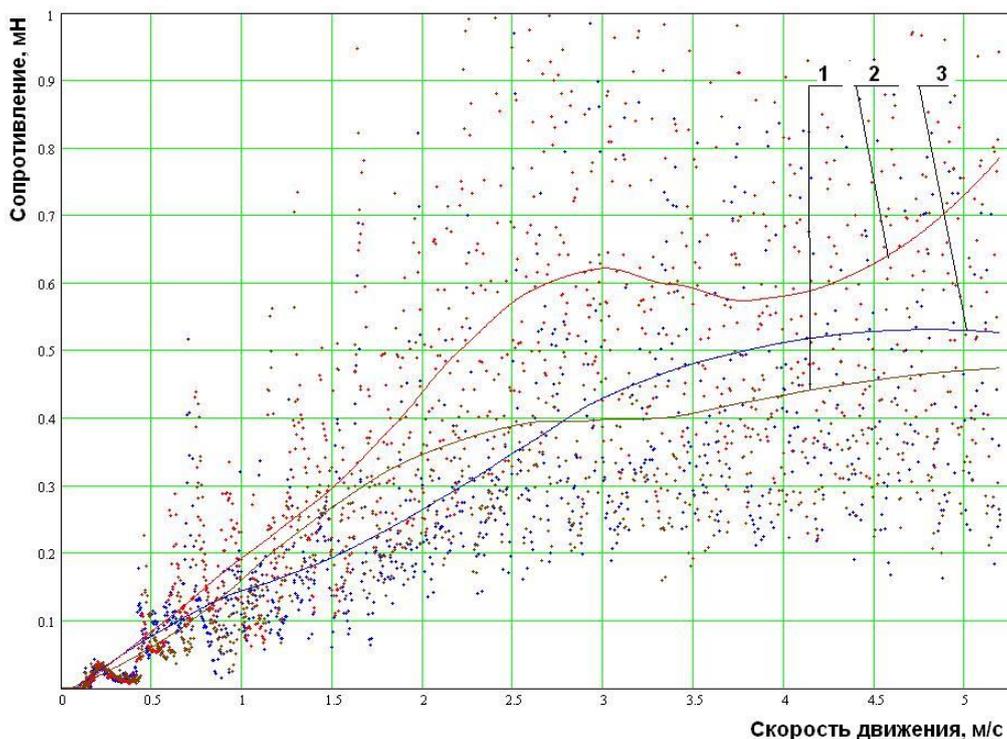


Рис. 7. Скоростная зависимость ледового сопротивления сухогруза пр. RSD 44 в каналах различной ширины

Сравнение кривых рис. 7 (1 – ширина канала 20 м; 2 – ширина канала 40 м; 3 – ширина канала 60 м) показывает, что в «рабочем» диапазоне роста ширины канала, заполненного мелкобитыми льдами, вряд ли можно прогнозировать снижение уровня ледового сопротивления судна.

Относительно невысокий уровень сопротивления при ощутимой величине достижимой скорости (около 3,0 м/с) и их гораздо более высокой стабильности оказывает сухогрузу тёртый лёд даже значительной толщины и сплочённости. На рис. 8 это продемонстрировано кривыми ледового сопротивления (В – расчётная, А – сглаженные значения) при движении теплохода в тёртых льдах толщиной 0,5 м и сплочённостью 9-10 баллов.

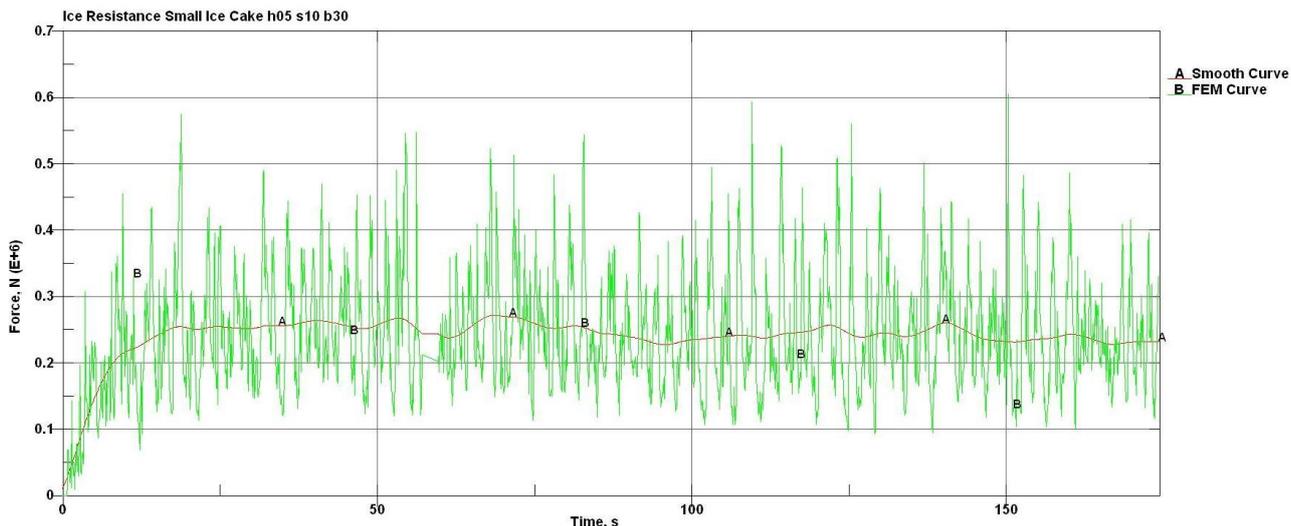


Рис. 8. Временная зависимость ледового сопротивления сухогруза пр. RSD 44 в тёртых льдах

Как показывает конечноэлементное моделирование, обусловлено это не только более низкой массой отдельных ледяных образований, препятствующих ходу судна. При движении в тёртых льдах канала впереди сухогруза образуется «ледовая подушка». Длина её нестабильна в процессе движения, в среднем составляя две трети от длины судна. Фронт «подушки» перемещается примерно со скоростью судна, проявляя демпфирующие свойства. В таких условиях на ледовом сопротивлении значительно в меньшей мере сказываются естественные неровности кромок канала, изменения его ширины и кривизны.

Результаты статистической обработки данных численных экспериментов по оценке ледовой ходкости сухогруза в «рабочем» диапазоне ледовых условий показаны на рис. 9 (толщина мелкобитых и тёртых льдов до 0,65 м; сплочённость 6 – 10 баллов; относительная ширина ледового канала 2,0 – 2,5). Для сравнения на рис. 10, 11 приведены аналогичные функции, рассчитанные для сопоставимых условий по нормативной методике [1] и с учётом классических полуаналитических подходов [2, 8].

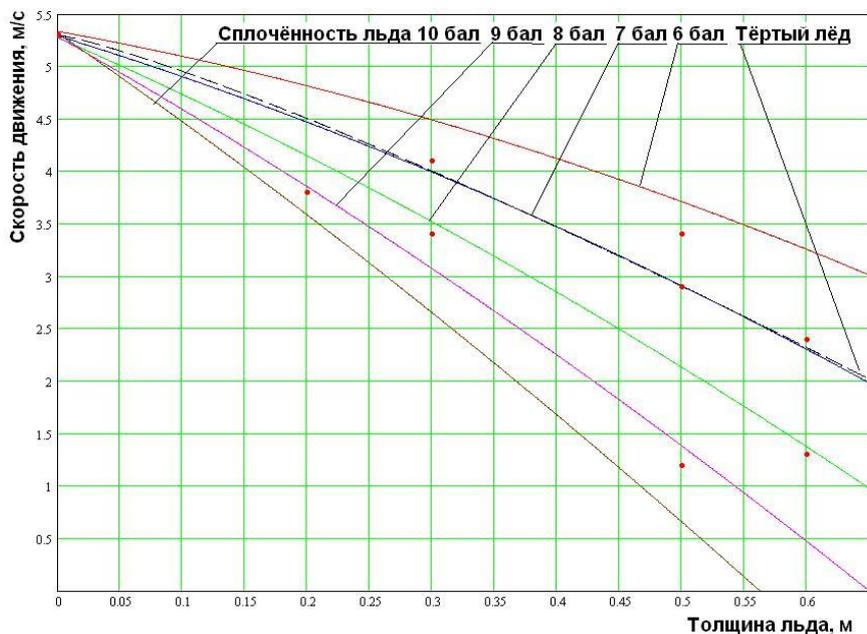


Рис. 9. Кривые ледовой ходкости сухогруза пр. RSD 44, полученные в результате численного моделирования

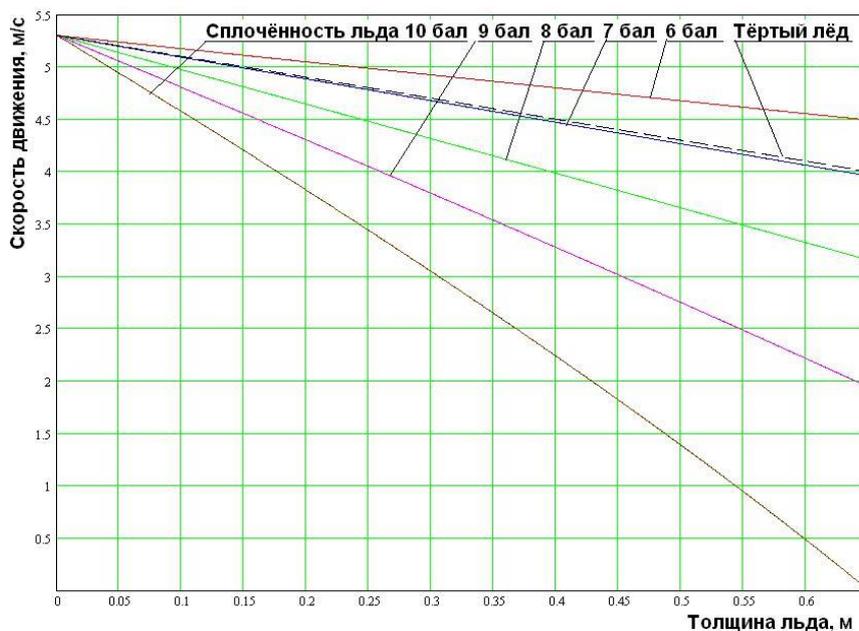


Рис. 10. Кривые ледовой ходкости сухогруза пр. RSD 44, рассчитанные по методике [1]

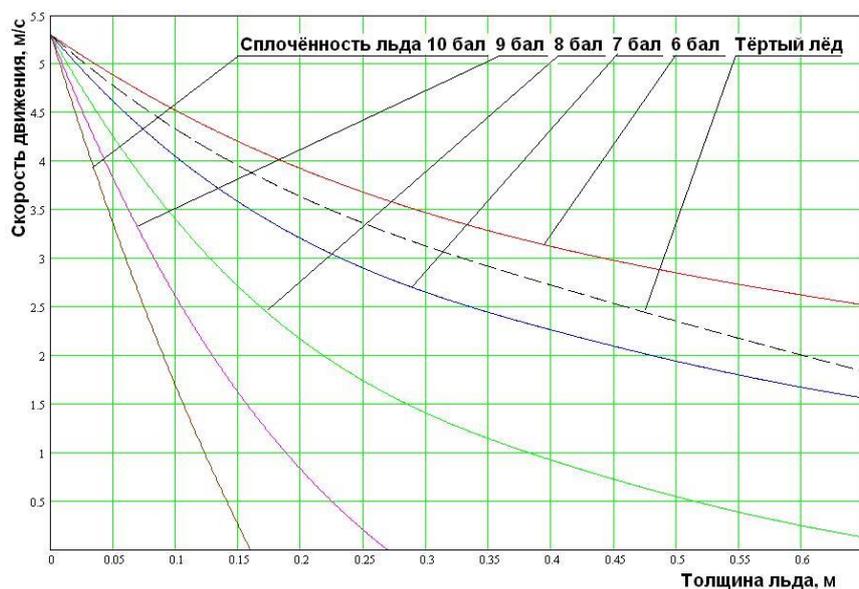


Рис. 11. Кривые ледовой ходкости сухогруза пр. RSD 44, рассчитанные по методикам [2, 8]

Первое, на что обращает внимание сравнительный анализ графиков (Рис. 9 – 11) – это слишком большой разброс в оценках расчётной ледовой категории судна. Согласно требованиям нормативной методики [1] она эквивалентна толщине мелкобитых льдов сплоченностью 9 баллов, преодолеваемых непрерывным ходом в канале при 20% уровне от достижимой скорости на чистой воде (при условии использования энергетической установки на полную мощность). Зависимости, показанные на рис. 9 – 11, показывают следующие величины этой характеристики: численный эксперимент – в пределах 0,55 м; методика [1] – около 0,8 м; методики [2, 8] – немногим менее 0,2 м. Как видно, нормативная методика [1] даёт

завышенный результат (близкий к ледовому классу «лёд-80»), методики [2, 8] – недооценку реальной ледопроеходимости теплохода.

Другой очевидный результат анализа кривых рис. 9 заключается в явной несогласованности нормированной ледовой категории (прочности судна) с ходовыми возможностями судна во льдах, подтвержденными численным моделированием. При установленном Речным регистром судоходства ледовом классе «лёд-20» для данного сухогруза его оптимальная энерговооружённость должна обеспечивать расчётную ледовую категорию в пределах 0,2 м. Фактически при полном использовании судовой энергетической установки в данных ледовых условиях следует ожидать почти трехкратного превышения достижимой скорости. Последнее связано с высоким риском получения теплоходом ледовых повреждений.

Выводы

1. Расчётная ледовая категория судна (его энерговооружённость) не соответствует установленному ледовому классу, что повышает риск ледовой аварийности данного проекта.
2. Как нормативные, так и классические полуэмпирические методики не дают адекватной оценки ледовой ходкости судов с нетрадиционными характеристиками. При невозможности проведения натуральных или модельных ледовых испытаний таких судов предпочтителен численный эксперимент, реализуемый, например, с помощью САЕ-систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция. Требования к транспортным судам, предназначенным для эксплуатации в ледовых условиях и при отрицательных температурах воздуха. РД 212.0148-87. Руководящий документ по стандартизации, группа Т50. Утверждён и введён в действие МРФ РСФСР 27.11.1987 г. – Л.: Транспорт, 1989. – 20 с.
2. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Соппротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
3. Лобанов В.А. Влияние льда на гидродинамику судна//Интернет-журнал «Науковедение». 2013 №3 (16) [Электронный ресурс].-М. 2013. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/06tvn313.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
4. Лобанов В.А. Ледовая ходкость танкера река-море плавания с нетрадиционными носовыми обводами//Интернет-журнал «Науковедение». 2013 №1 (14) [Электронный ресурс].-М. 2013. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/55tvn113.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
5. Лобанов В.А. Оценка ледовой ходкости судна численными методами. Дифференциальные уравнения и процессы управления, №1, 2011. Электронный журнал, рег. №ФС77-39410 от 15.04.2010 ISSN 1817-2172, <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/j/pdf/lobanov5.pdf>
6. Лобанов В.А. Численные оценки ледовых качеств гребных винтов//Интернет-журнал «Науковедение». 2012 №4 (13) [Электронный ресурс].-М. 2012. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/51tvn412.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
7. Расчёт скорости судна. Классификационный проект RSD44-LMPP-053. – Одесса.: Морское инженерное бюро, 2009. – 7 с.
8. Сандаков Ю.А. Об определении полного ледового сопротивления речных судов в битых льдах // Тр. ГИИВТА. Судовождение на внутренних водных путях.

Горький, 1971. Вып. 116. ч. 2. с. 85 – 89.

9. Свидетельство о допустимых условиях ледового плавания. Циркулярное письмо главного управления Российского морского регистра судоходства № 314-2.2-547ц от 19 декабря 2011 г.
10. СНиП 2.06.04-82 Нагрузки от воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые, от судов). – М.: Стройиздат, 1983. – 38 с.
11. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – 498 p.
12. Manfred Heer. Integration of the Rudder Propeller into the Ship's Structure. Tugology-2009. Amsterdam, 2009. – 41 p. – Режим доступа: [http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/eng/Integration of the Rudderpropeller.pdf](http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/eng/Integration_of_the_Rudderpropeller.pdf), свободный.

Рецензент: Тихонов Вадим Иванович, доктор технических наук, профессор, Волжская государственная академия водного транспорта.