

**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](mailto:lobbas@mail.ru)

05.22.19 Эксплуатация водного транспорта, судовождение

### **Численные оценки ледовых качеств гребных винтов**

#### **Numerical Evaluations of Propellers ice Performance**

**Аннотация:** В работе описаны некоторые приёмы численного моделирования с помощью CAE-систем процесса взаимодействия гребного винта со льдом. По результатам пост-процессорной обработки данных уточнены факторы, определяющие уровень и характер ледовых повреждений и пропульсивные качества судовых движителей. Сделаны выводы о применимости CAE-систем при разработке нормативных документов, регламентирующих ледовое плавание судов.

**The Abstract:** The paper describes some of the techniques of numerical modeling with the help of CAE-systems of the process of interaction of a propeller with ice. According to the results of postprocessor processing of the data specified factors that determine the level and nature of ice damage and propulsion ability of the ship's propulsion. Conclusions are made about the applicability of CAE-systems in developing normative documents regulating the ice navigation of vessels.

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

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

\*\*\*

#### **Введение**

В декабре 2011 года Российский морской регистр судоходства (РМРС) утвердил новый регламентирующий документ – Свидетельство о допустимых условиях ледового плавания судна (свидетельство) [9]. Следует отметить, что пока он не является обязательным – РМРС *рекомендует* иметь свидетельство поднадзорным ему судам, участвующим в ледовых транспортных операциях. Однако есть основания полагать, что с течением времени в отношении флота, не подтверждённого наличием подобного документа, сформируется ряд дискриминационных условий при организации ледовых проводок. В первую очередь это касается транспортных судов внутреннего и смешанного плавания, если и имеющим ледовые категории в символе класса, то, как правило, не выше уровня «Ice-1» («лёд-40»). Поэтому заинтересованные судовладельцы начинают процедуры получения свидетельств (по крайней мере, для вновь построенных и имеющих ледовые категории судов).

Свидетельство выдаётся по заявке судовладельца после внеочередного освидетельствования судна. При этом обязательным условием получения этого документа является экспер-

тиза основных ледовых качеств судна. Таковая экспертиза предшествует освидетельствованию и выполняется компетентной организацией, уполномоченной для этих целей РМРС (ВГАВТ имеет такой статус). По результатам экспертизы разрабатывается содержательное приложение к свидетельству, оформленное, например, в виде ледового паспорта судна.

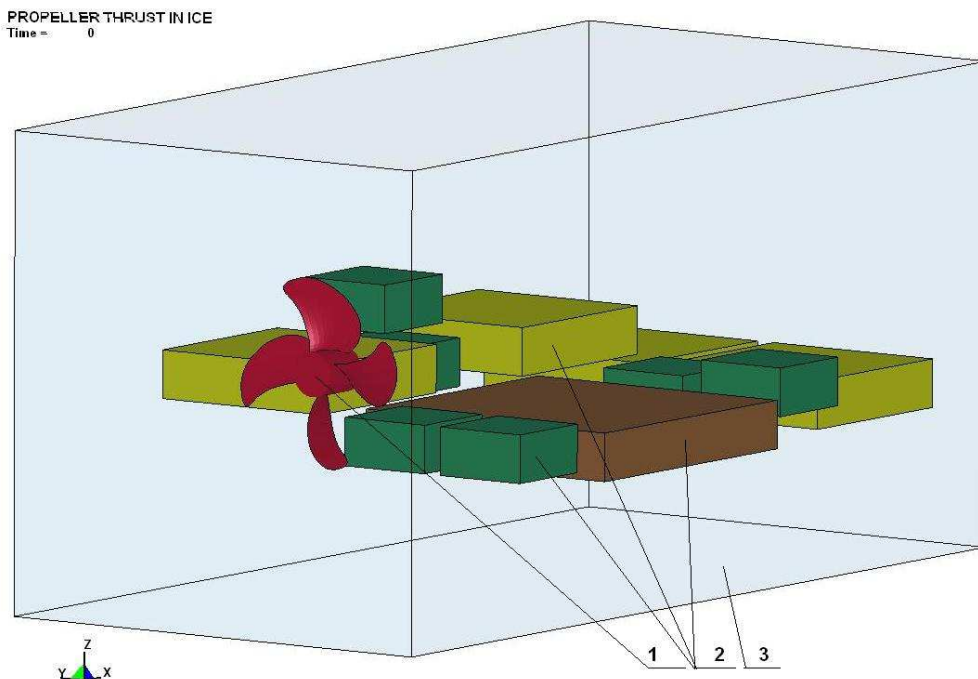
В ряду оцениваемых ледовых качеств учёту подлежат прочность и пропульсивные характеристики гребных винтов. Одной из признанных РМРС составляющих экспертизы являются расчёты по методикам, обоснованное предпочтение которым отдают эксперты. Опыт использования известных полуэмпирических (полуаналитических) решений убедил ледовых экспертов ВГАВТ в их ограниченности. Кроме того, ледовый паспорт требует анализа некоторых режимов эксплуатации движителей, которые для подобных методик являются «нерасчётными». Поэтому наряду с упомянутыми методиками для решения экспертных проблем специалисты ВГАВТ активно используют САЕ-системы [12].

САЕ-системы – это программные комплексы, реализующие численные (чаще в конечноэлементной постановке) 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 в сочетании с традиционными решениями – это инструмент, обеспечивающий оптимальное соотношение затрат судовладельца на проведение анализа ледовых качеств судов с достоверностью получаемых результатов.

Ниже приведены характерные примеры численного моделирования процесса взаимодействия гребного винта со льдом в сравнении с утверждениями традиционных полуаналитических методик.

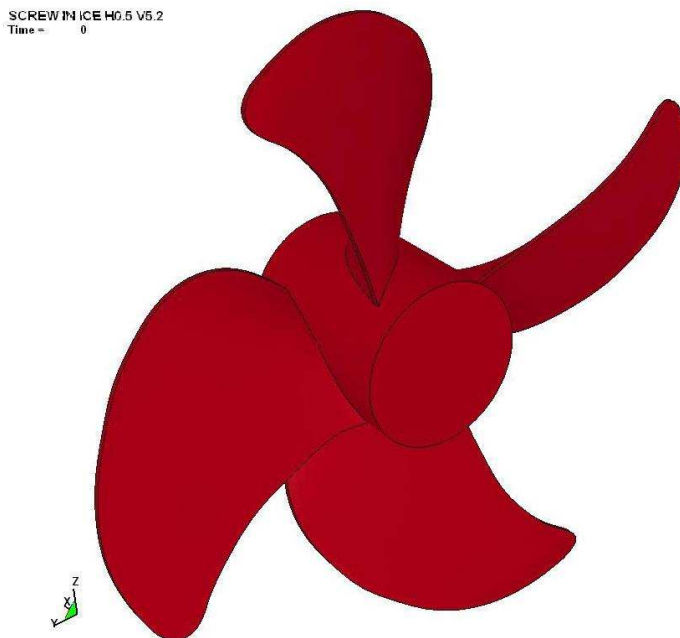
## Модель

Прогноз ледовых качеств гребного винта с применением численных методов связан с реализацией конечноэлементной модели, пример которой показан на рис. 1.



**Рис. 1.** Конечноэлементная модель для оценки ледовых качеств гребного винта  
(1 – гребной винт; 2 – льдины; 3 – вода)

При этом моделировалось прямолинейное движение изолированного винта (1) в воде (3), содержащей различные ледяные образования (2). Некоторые льдины были зафиксированы по одной или нескольким кромкам, другие имели все степени свободы. Таким образом, обеспечивались все «расчётные» режимы контакта лопастей со льдом. Кроме того, при отсутствии вращательного движения винта анализировался и «нерасчётный» режим – «навал» лопасти на неподвижную льдину. Прототипом движителя в данной работе использован ледовый винт танкера смешанного плавания проекта 19614 (Рис. 2).



*Рис. 2. Модель гребного винта*

Типы, формулировки конечных элементов, модели материалов, алгоритмы контактных взаимодействий тел обоснованы автором в свободно доступных источниках [6-8]. Общее количество конечных элементов модели в зависимости от варианта расчёта незначительно колебалось в пределах 400 000 ед. В вариантах изменялись скорость поступательного и вращательного движения винта, момент на гребном валу и толщина льда.

### **Прочность**

Подавляющая часть транспортного флота внутреннего и смешанного плавания (а именно этот вид флота является объектом специализации ледовых экспертов ВГАВТ), имеющего ледовые подкрепления, допускается нормативами Регистров (Морского и Речного) к плаванию лишь в мелкобитых льдах толщиной не более 0,5 м. Оценки общей прочности лопастей винтов у данных судов показывают её значительное превышение над уровнем расчётных ледовых нагрузок в допустимом интервале толщин льда и при соблюдении «расчётных» режимов эксплуатации («фрезерование» льда или удар об отдельно плавающую льдину). При этом данный вывод подтверждается как нормативными [4], альтернативными [1,5,10,11] методиками (Рис. 3), так и численным экспериментом (Рис. 4).

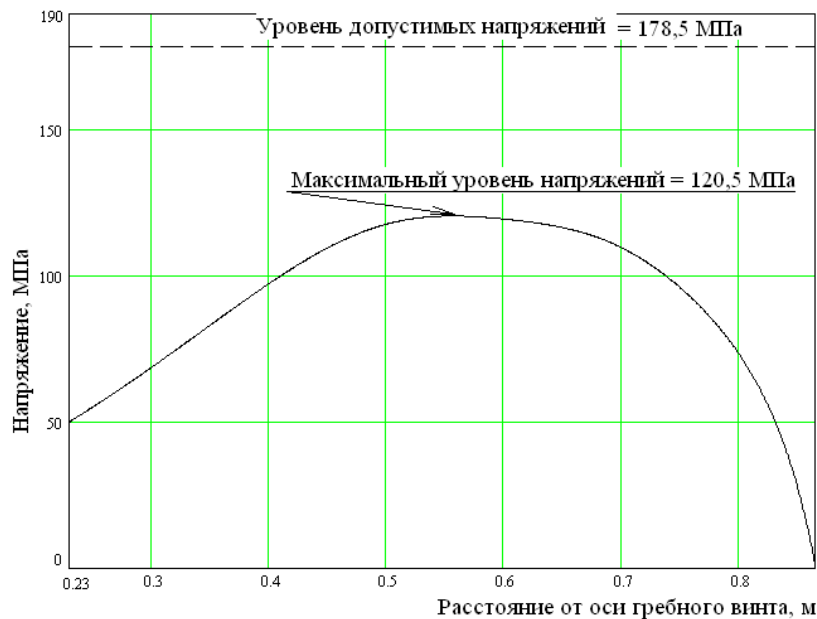


Рис. 3. Распределение расчётных ледовых напряжений [4] по длине лопасти гребного винта

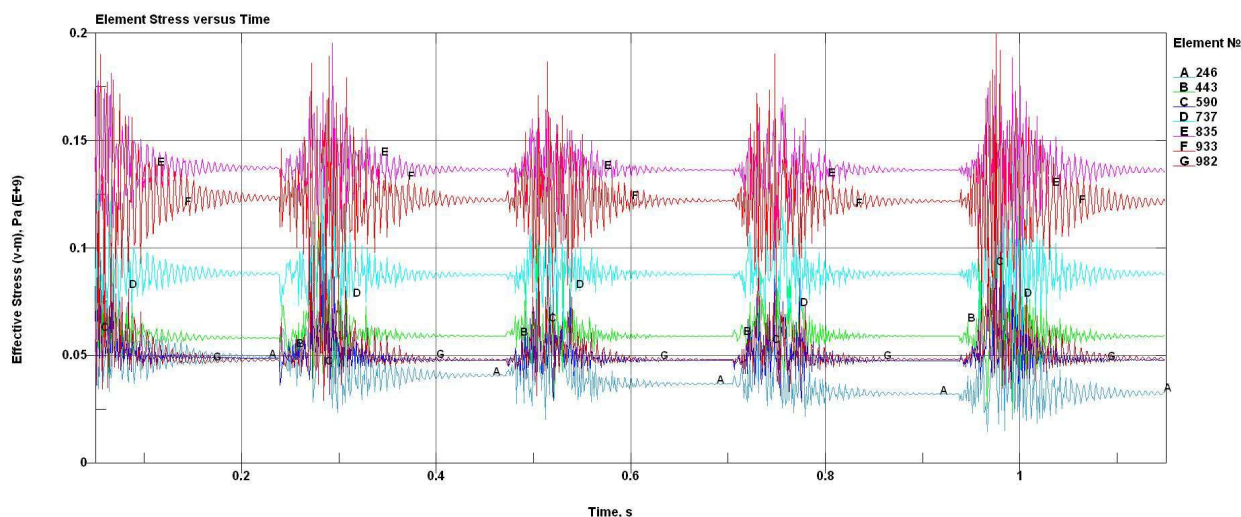
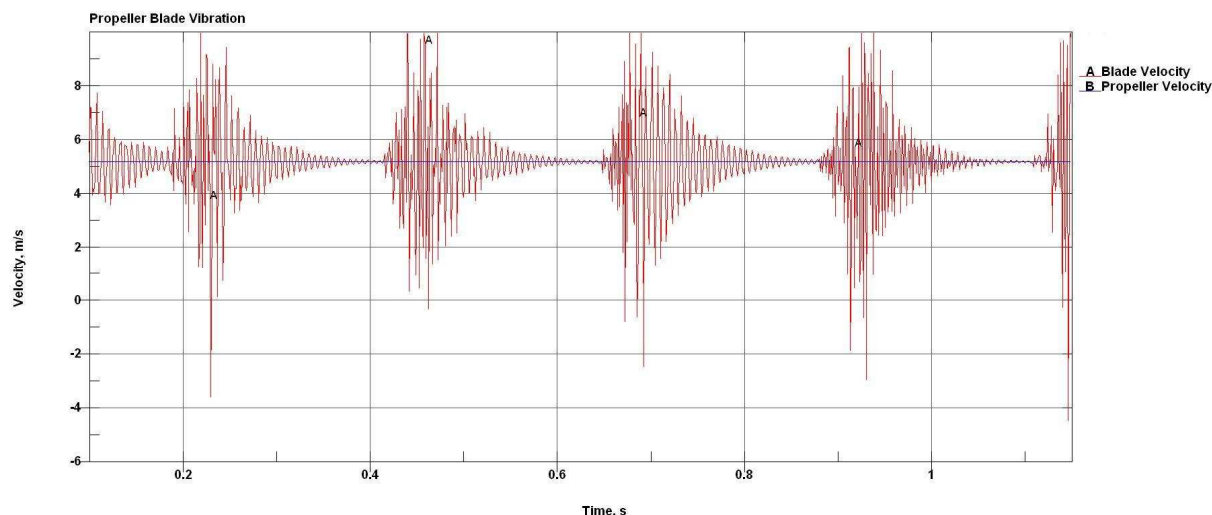


Рис. 4. Временная зависимость напряжений в элементах лопасти гребного винта (толщина льда – 0,5 м; режим – «фрезерование»)

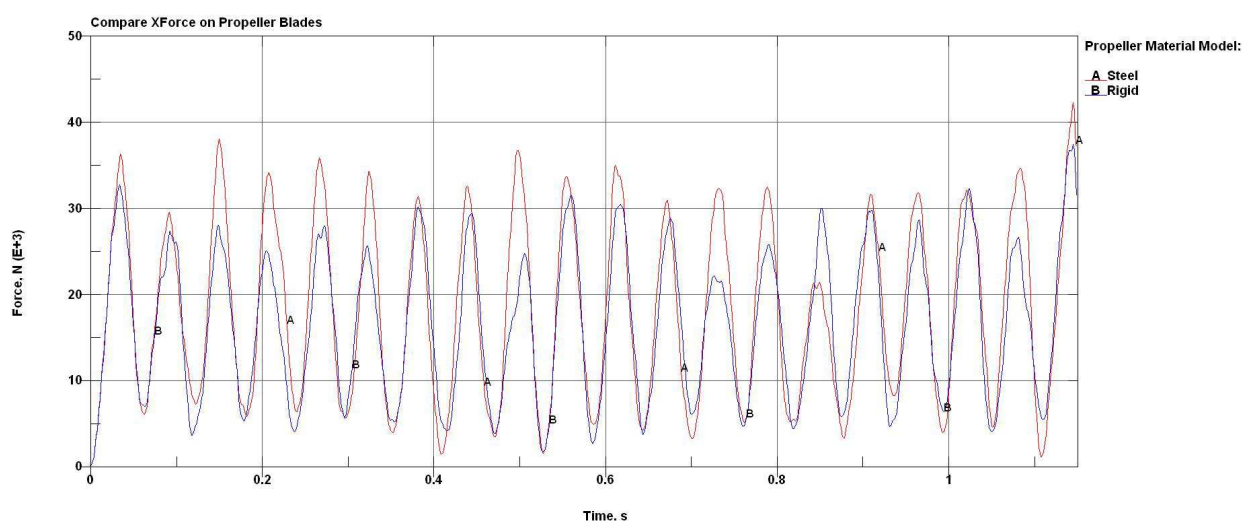
Но эксплуатационная непригодность винта далеко не всегда эквивалентна только потере несущей способности лопасти. Недостаточная местная прочность кромок лопастей также является распространённой причиной ледовых повреждений движителей, несовместимых с их дальнейшей безопасной эксплуатацией [10]. Поэтому проверка вероятного уровня ледовой эрозии кромок (или их местной деформации) в различных режимах работы винта является обязательным условием разработки ледового паспорта судна.

Необходимо отметить, что в обширном перечне работ, описывающих взаимодействие гребного винта со льдом, труды по оценкам местной ледовой прочности движителей не отличаются многообразием. Внимание на себя обращает, пожалуй, единственный источник – [1]. Здесь на основе гидродинамической модели удара твёрдого тела о лёд теоретически обоснован метод расчёта давлений (нагрузок) на кромке лопасти при дроблении ею льдины. Однако

достоверность предложенного решения сомнительна, что подтверждается рядом результатов численного эксперимента, полученных в настоящей работе. Так, допущение об абсолютной жёсткости лопастей винта вряд ли можно признать корректным в рамках решения данной задачи. Учёт податливости лопасти (Рис. 5) в процессе контакта со льдом ощутимо сказывается на уровне прогнозируемых ледовых усилий (Рис. 6).



**Рис. 5.** Характер вибрации конца лопасти стального винта  
(толщина льда – 0,5 м; режим – «фрезерование»)

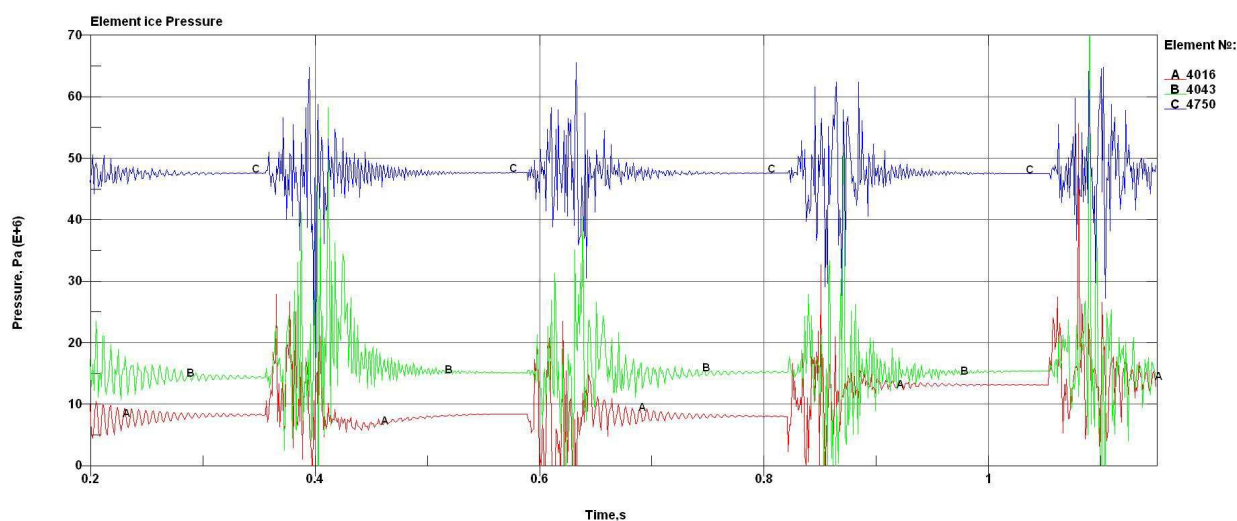


**Рис. 6.** Сравнительный анализ продольных ледовых нагрузок на лопастях винта  
при различных моделях материалов  
(толщина льда – 0,5 м; режим – «фрезерование»)

Как видно из рис. 5, амплитуда скорости продольных колебаний конца лопасти (кривая А) сопоставима с величиной поступательной скорости винта (линия В) при значимой длительности эффективного контакта лопасти со льдиной ( $\approx 0,15$  с). Анализ кривых продольных ледовых усилий (Рис. 6) показывает, что модель абсолютно жёсткого винта даёт эффект «сглаживания» нагрузки (Рис. 6, линия В). Стальной движитель (сталь 08Х14НДЛ) против жёсткого испытывает гораздо большие нагрузки. Превышение в среднем составляет около

20%, достигая 1,5-кратной величины (Рис. 6, линия А). Причём этот вывод справедлив как для постоянной частоты вращения двигателя, так и для постоянного момента на гребном валу.

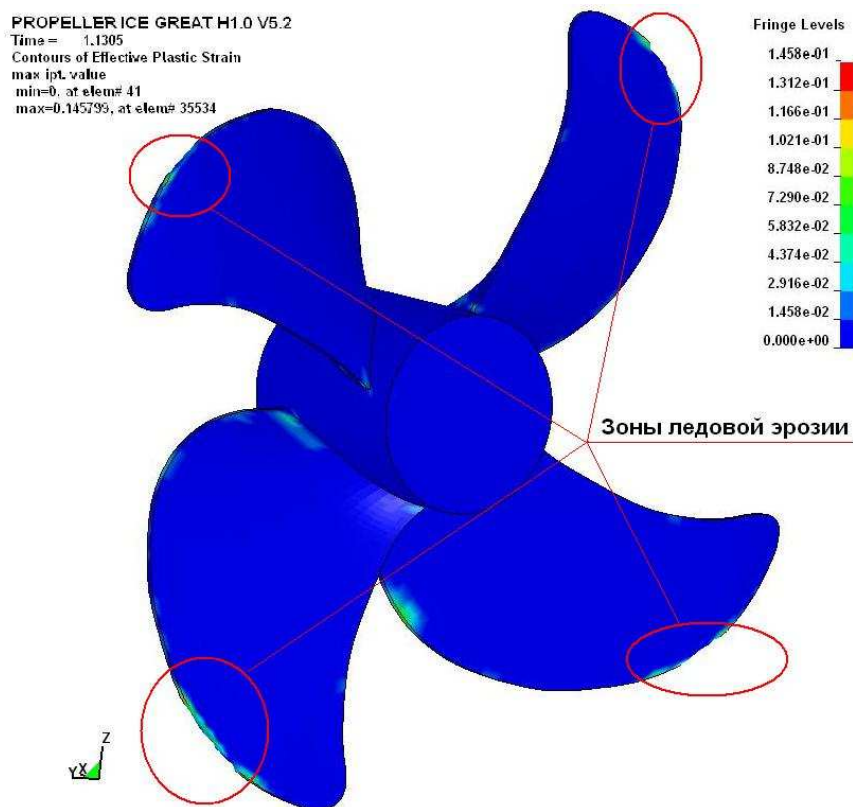
Показательными в отношении ограниченности модели абсолютно жёсткой лопасти являются также данные, иллюстрируемые рис. 7. Кривые, приведённые здесь, описывают временной ход ледовых давлений на режущей кромке стальной лопасти. Их анализ показывает, что давления, испытываемые корневым и средним участками кромки (линии А и В) близки к аналитическим оценкам (источник [1] прогнозирует давления в пределах 16-18 МПа). Концевая часть кромки (кривая С) испытывает давления, примерно втрое превосходящие уровень, предсказываемый методикой [1]. Объяснить это различие можно только тем, что формоизменение средней и корневой частей лопасти при контакте со льдом значительно меньше, чем у её вершины.



**Рис. 7.** Временная зависимость ледовых давлений на режущей кромке лопасти (толщина льда – 0,5 м; режим – «фрезерование»)

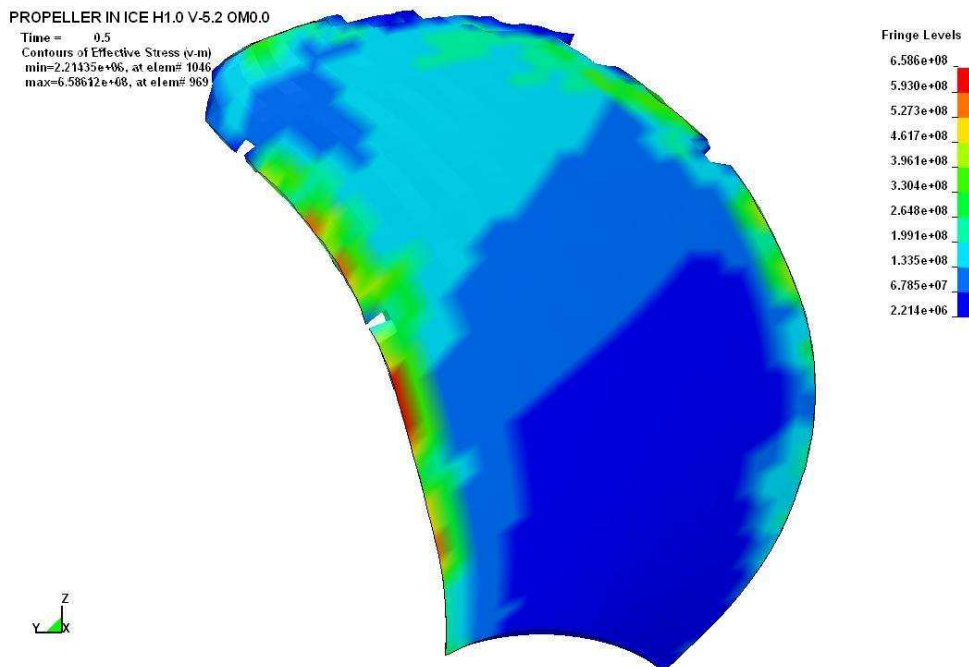
Оценки местной ледовой прочности кромок лопастей винта чувствительны к учёту эффекта скоростного упрочнения материала двигателя. Игнорирование этого эффекта известными полуэмпирическими методиками также снижает достоверность их прогнозов. Справедливым будет отметить, что в работах [1,5] производилась верификация результатов с применением развитой CAE-системы ANSYS. Однако это заявление не сопровождается детальным описанием реализованных моделей (геометрией, параметрами конечноэлементного разбиения, типами и формулировками конечных элементов, моделями используемых материалов, алгоритмами контактного взаимодействия тел), поэтому обсуждение их невозможно.

В рамках данной работы скоростное упрочнение винтовой стали учитывалось в соответствии с моделью Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) [2]. Ряд расчётных вариантов был выполнен без учёта упомянутого эффекта. Сравнительный анализ результатов показал, что в режиме «фрезерование» лёд толще даже двукратного нормативного значения не представляет опасность для данного двигателя, если в модель материала двигателя был включён эффект скоростного упрочнения стали. В противном случае явно обнаруживалась ледовая эрозия кромок лопастей (Рис. 8).

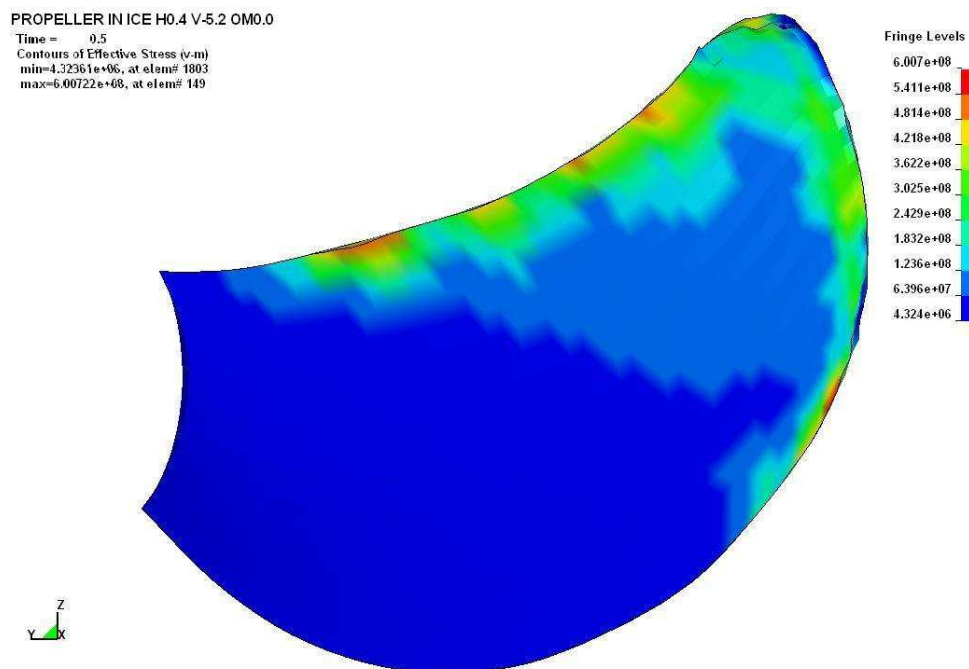


**Рис. 8.** Характер повреждений винта при отсутствии в модели эффекта скоростного упрочнения стали (толщина льда – 1,0 м; режим – «фрезерование»)

Неизбежное маневрирование судна во льдах (например, разворот способом «звезда») может сопровождаться неоднократным реверсированием движителей, что связано с высокой вероятностью навала остановленного винта на неподвижный лёд. Практика ледового судоходства показывает, что это наиболее опасный режим взаимодействия лопасти с ледяным покровом, хотя традиционными методиками он упоминается как «нерасчётный». Поэтому вероятные повреждения, сопутствующие контакту невращающегося движителя со льдом, также являются показателем ледовой прочности гребного винта, отображаемым в ледовом паспорте судна. Ряд примеров численных оценок таких повреждений проиллюстрирован на рис. 9.

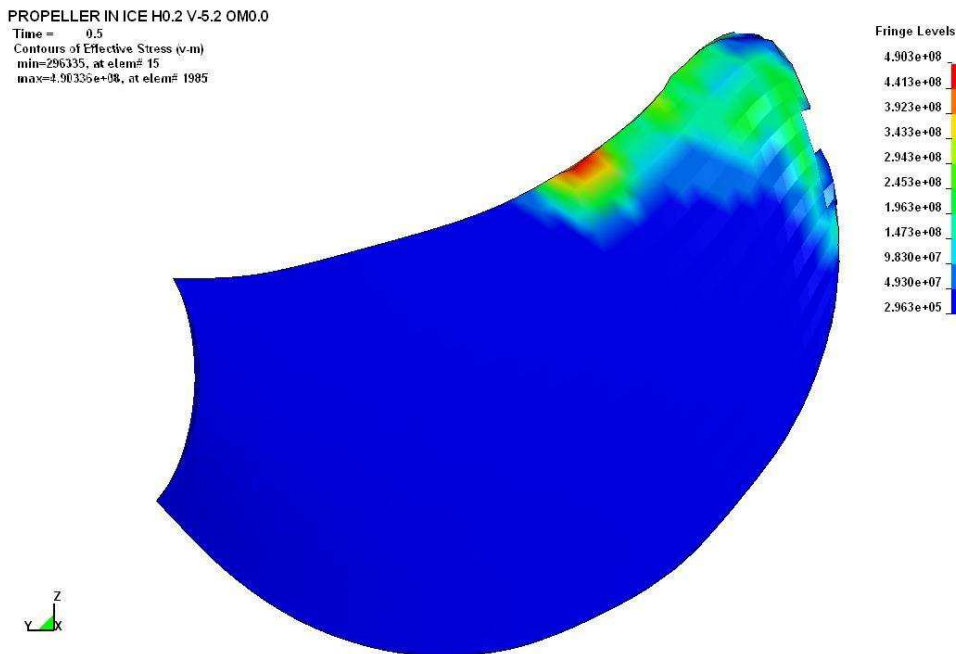


a



б

8



В

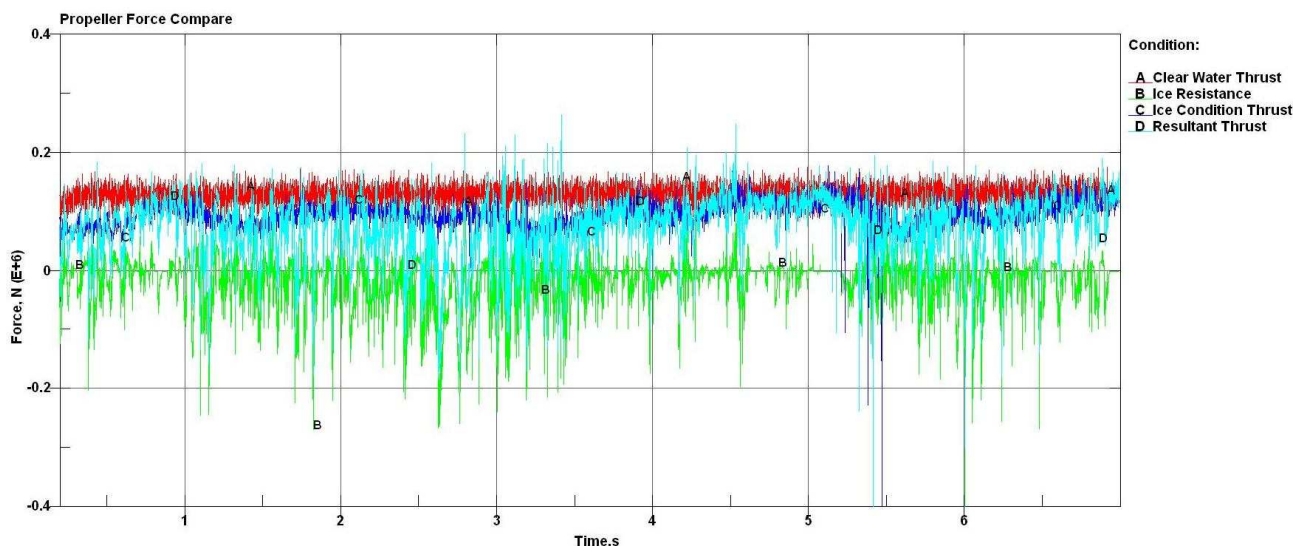
**Рис. 9.** Качественная картина повреждений, полученных лопастью винта в результате её навала на неподвижный лёд (а – толщина льда 1,0 м; б – толщина льда 0,4 м; в – толщина льда 0,2 м)

Данные рис. 9 показывают, что в реальном диапазоне рабочих толщин зимнего неразрушенного льда при навале неработающего винта на припайный лёд его лопасти получают разрушения кромок, несовместимые с дальнейшей эксплуатацией движителя. Абсолютную безопасность винта конечноэлементное моделирование прогнозирует только для сильно разрушенных льдов (4-5 баллов) толщиной не более 0,2 м.

### Пропульсивные характеристики

Все авторы, когда-либо решавшие задачи ледовой ходкости, отмечали влияние попадавшего в движители льда на их пропульсивные качества. Однако можно утверждать, что до сих пор нет адекватного теоретического описания этой связи. Основной причиной этого следует признать отсутствие технических средств, реализующих отдельное измерение гидродинамического и ледового упора. Поэтому упор винта при его работе во льдах во всех методиках по оценкам ходкости априорно принимается независимым от ледовых условий и равным гидродинамическому упору движителя на чистой воде при прочих равных параметрах движения (скорости судна и частоты вращения винта) [3,5].

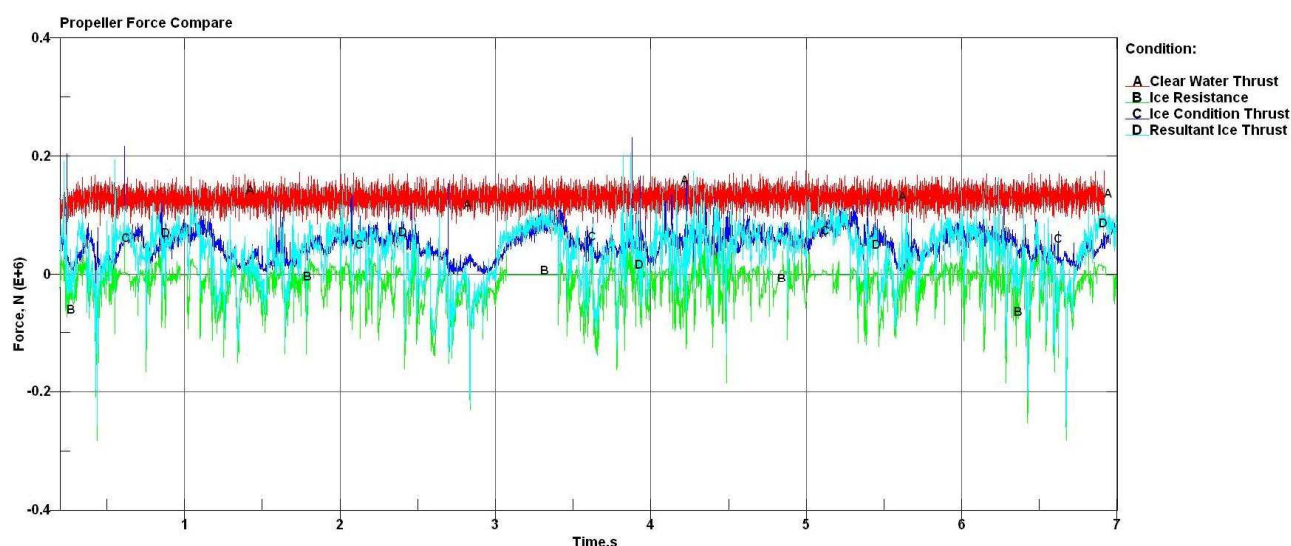
С применением CAE-систем у экспертов появился инструмент для оценки воздействия льда на пропульсивные характеристики винта. При этом результаты численных экспериментов показывают, что в общем случае пренебрежение этим влиянием несправедливо (Рис. 10).



**Рис. 10.** Сравнение ледовых и гидродинамических нагрузок, действующих на движитель при постоянной частоте вращения

Анализ зависимостей рис. 10 показывает, что упор винта в чистой воде при скорости движения 1,0 м/с и частоте вращения (256 об/мин) стабилизируется в пределах 130 кН (кривая А). Перемещение движителя с той же скоростью и частотой вращения в условиях тёртых льдов толщиной 0,5 м даёт кривую гидродинамического упора (линия С), не обладающую монотонностью и существенно более низкого уровня (в среднем на 40 кН). Если же дополнительно учесть ледовое сопротивление винта (линия В), то его результирующий ледовый упор снизится еще, примерно, на 10 кН (кривая D), в среднем составляя около 80 кН.

Худшая картина для тех же ледовых условий наблюдается при поддержании номинального постоянного момента на гребном валу 35 кН·м (Рис. 11).

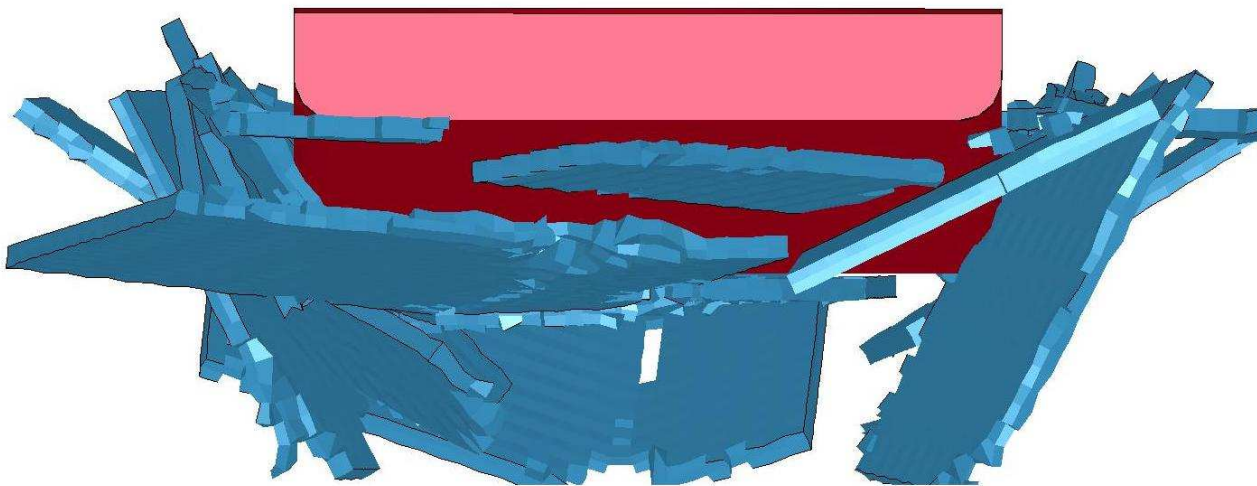


**Рис. 11.** Сравнение ледовых и гидродинамических нагрузок, действующих на движитель при постоянном моменте на гребном валу

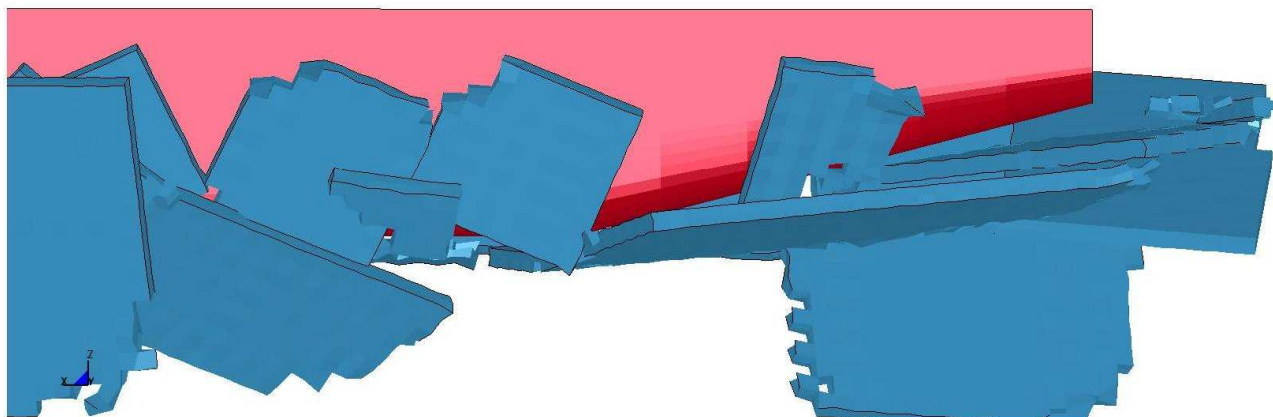
Недостаток крутящего момента при преодолении сопротивления льда сильно сказывается на частоте вращения двигателя. В результате разброс значений результирующего ледового упора (Рис. 11, кривая D) принимает большое значение (СКП  $\approx 47$  кН) при его математическом ожидании около 40 кН.

Автор отдаёт себе отчёт в том, что показанные выше результаты носят дискуссионный характер в отношении их практической применимости. Обусловлено это анализом слишком упрощённой конечноэлементной модели. При решении реальных задач для оценок пропульсивных свойств двигателей необходимо описание взаимодействия триады «судно (с двигателями) – вода – ледяной покров». Однако это требует очень высокой степени дискретизации модели, что на несколько порядков увеличивает её ресурсоёмкость.

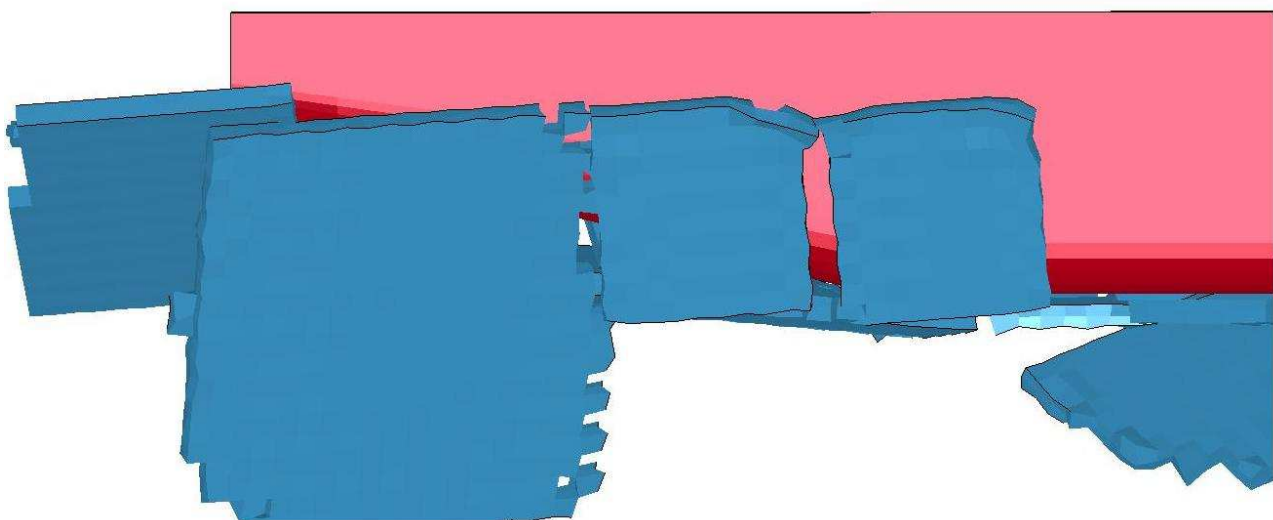
Реализация полной модели на данном этапе оказалась «неприподъёмной» задачей для вычислительной системы автора, поэтому для сохранения высокой адекватности результатов численных экспериментов при многократном снижении ресурсоёмкости задач по оценкам ледовой ходкости (управляемости) используется следующий приём. На первом этапе производится конечноэлементное моделирование буксировочных испытаний судна во льдах заданных характеристик (толщина, сплочённость, раздробленность, ширина ледового канала). При этом процесс движения сопровождается качественным анализом характера «обтекания» льдом кормовой оконечности судна (Рис. 12).



а



б



в

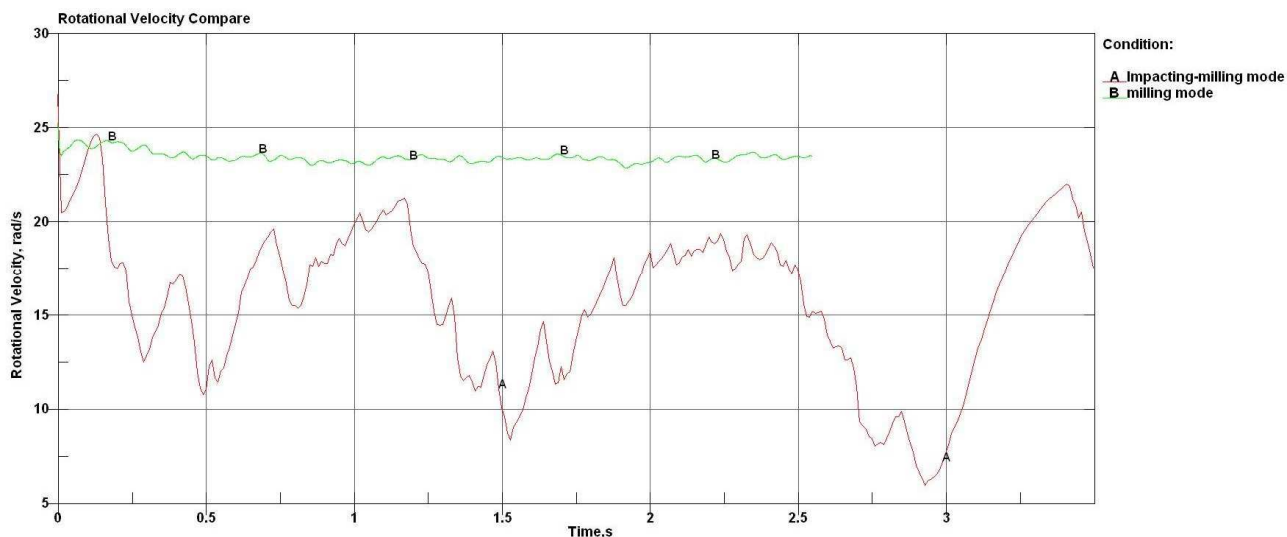
**Рис.12.** Характер «обтекания» льдом кормовой оконечности судна  
(а – вид с кормы; б – вид с левого борта; в – вид с правого борта)

На втором этапе для нескольких фиксированных параметров работы движителя (скорости, частоты вращения или момента на гребном валу) с учётом наиболее вероятного распределения льдов в районе винтов реализуется модель, показанная на рис. 1. По результатам статистической обработки данных, полученных здесь, строится кривая результирующего ледового упора винта в зависимости от характеристик его работы.

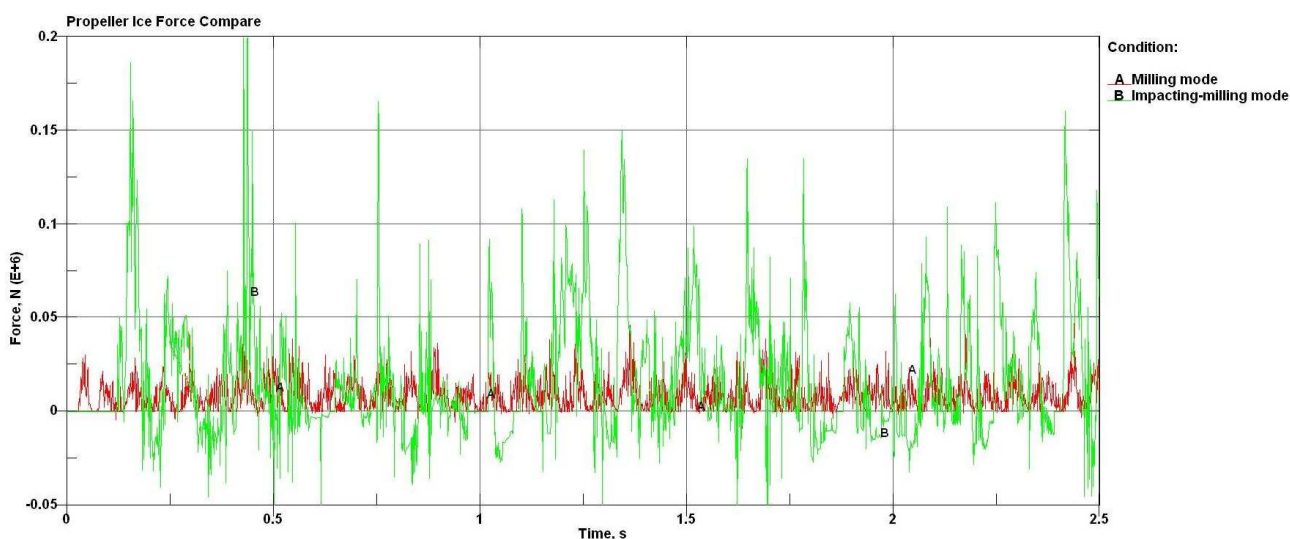
Заключительный этап связан с непосредственной оценкой ходкости судна. Особенность его заключается в том, что действие судовых винтов заменяется узловыми корпусными силами, сосредоточенными в районе движителей. Закон изменения этих сил – это кривая результирующего ледового упора винтов, полученная на предыдущем этапе.

При решении задач эксплуатационного характера (непосредственно не связанных с оценками условий безопасного маневрирования судна во льдах) вполне допустимо отсутствие последнего этапа моделирования. При этом для прогноза эксплуатационной ходкости необходимо сопоставление кривых результирующего ледового упора движителей и ледового сопротивления корпуса судна. Последнее определяется на первом этапе моделирования.

Следует также отметить эксперимент «чистого фрезерования» неподвижной льдины, поставленный в работах [1,5]. Вряд ли его можно признать показательным, так как в нём смоделированы маловероятные условия. В естественной среде винт работает в окружении плавающих льдин при возможном одновременном контакте нескольких лопастей со льдом. Результаты численных экспериментов показывают слишком большую разницу этих режимов, чтобы делать какие-либо прогнозы пропульсивных качеств винта (а равно и частот вибрации [5]) на основе эксперимента «чистого фрезерования». В подтверждение этого на рис. 13 и 14 приведены временные зависимости частоты вращения движителя и его ледового сопротивления при постоянном моменте на гребном валу для «натурного» режима и режима «чистого фрезерования».



**Рис. 13.** Сравнение частот вращения винта  
(толщина льда – 0,5 м; скорость движения – 1,0 м/с)



**Рис. 14.** Сравнение уровней ледового сопротивления винта  
(толщина льда – 0,5 м; скорость движения – 1,0 м/с)

Так потери скорости вращения винта при «чистом фрезеровании» не превосходят 10% от её номинала при стабилизации в пределах 24 рад/с (рис. 13, линия В). В «натурных» условиях стабилизация вообще не наблюдается (рис. 13, линия А), можно говорить лишь о некотором среднем уровне – 16 рад/с.

Уровень ледового сопротивления движителя в режиме «чистого фрезерования» (рис. 14, кривая А) многократно ниже того же параметра для «натурного» режима работы винта (рис. 14, кривая В). Кроме того, «натурный» режим отличает явный знакопеременный характер продольных ледовых нагрузок на лопастях.

### **Выводы**

1. Прочность и пропульсивные характеристики являются принципиально важными ледовыми качествами движителей, отображаемыми в нормативных судовых документах.
2. Известные полуэмпирические методики не дают адекватных оценок местной ледовой прочности кромок лопастей гребных винтов. В зависимости от конкретных условий также может потребоваться уточнение предлагаемых подходов в расчётах результирующего ледового упора движителей.
3. Моделирование с помощью САЕ-систем процесса взаимодействия гребного винта со льдами отличает высокая достоверность результатов. Поэтому допустимо их использование при разработке нормативных документов, регламентирующих ледовое плавание судов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Санкт-Петербург, 2006. – 254 с.: ил. РГБ ОД, 71 09-5/118
2. Грушко А.В. Определение параметров скоростного упрочнения материала по его твёрдости. // Вестник национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Новые решения в современных технологиях», № 45, 2011 – с. 119-124.
3. Зуев В.А., Рабинович М.Е., Яковлев М.С. Динамические расчёты ледоколов. Учебное пособие. Горьковский политехнический институт. – Горький, 1986. – 68 с.
4. Инструкция. Требования к расчёту и проектированию открытых гребных винтов и валопроводов судов ледового плавания. РД 212.0147-87. Руководящий документ по стандартизации, группа Т50. Утверждён и введён в действие МРФ РСФСР 27.11.1987 г. – Л.: Транспорт, 1989. – 52 с.
5. Караулин Е.Б., Караулина М.М., Беляшов В.А., Белов И.М. Оценка периодических нагрузок, действующих на гребной винт при взаимодействии со льдом. // Научн. - техн. сборник Российского Морского Регистра Судоходства. Вып. 31. – СПб.: РМРС, 2008. – с. 93-106.
6. Лобанов В.А. Алгоритм контактного взаимодействия тел со льдом в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, №3, 2009. Электронный журнал, рег. №П2375 от 07.03.97 ISSN 1817-2172, <http://www.neva.ru/journal/j/pdf/lobanov2.pdf>

7. Лобанов В.А. Гидродинамика льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, №1, 2010. Электронный журнал, рег. №П2375 от 07.03.97 ISSN 1817-2172, <http://gamma.niimm.spb.su/diffjournal/j/pdf/lobanov3.pdf>

8. Лобанов В.А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, №4, 2008. Электронный журнал, рег. №П2375 от 07.03.97 ISSN 1817-2172, <http://www.neva.ru/journal/j/RU/numbers/2008.4/issue.html>

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. Сливаев Б.Г. Обеспечение безопасной эксплуатации судов ледового плавания при ударном взаимодействии гребных винтов со льдинами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 05.22.19 – эксплуатация водного транспорта, судовождение, 05.08.04 – технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Владивосток, 2001. – 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/1598-2

11. Belyashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades. Proc. 12th Int. Conf. on Port and Ocean Eng., POAC-93. – Hamburg, 1993. – vol. 2, pp. 359 – 368.

12. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – 498 p.

**Рецензент:** Клементьев Александр Николаевич, зав. кафедрой, доктор технических наук, Волжская государственная академия водного транспорта.