УДК 656.621/.626

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ЛЕДОВЫХ КАЧЕСТВ СУДНА. ХОДКОСТЬ

© Василий Алексеевич Лобанов
Волжская государственная академия водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия
e-mail: lobbas@kis.ru

Аннотация. *В рамках данной работы проведена серия опытов по конечноэлементному моделированию движения судна в различных ледовых условиях. Проведён сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными данными, рассчитанными с использованием традиционных методик. Отмечены значимые различия классических и численных методов в оценках характера и уровня ледового сопротивления и ходкости судна во льдах. Сделан вывод о неадекватности традиционных методик при решении широкого круга задач по обеспечению безопасности ледового судоходства.*

Ключевые слова: *судно, ледяной, ходкость, конечноэлементный*

NUMERICAL EVALUATION OF ICE VESSEL CONVENIENCE. PROPULSION ABILITY

© V.A.Lobanov
Russia, Nizhniy Novgorod, Volga State Academy of Water Transport

Abstract. *Within the framework of the given article a series of experiences on finite element to simulation of motion of a vessel in different ice conditions is lead. The comparative analysis of the obtained outcomes with the analogous datas calculated with use of traditional methods is lead. Significant differences classical and numerical methods in evaluations of character and a level of ice resistance and propulsion ability of a vessel in ice are marked. The output about inadequacy of traditional methods is made at a solution of the broad audience of problems on a safety of ice navigation.*

Keywords: *vessel, ice, propulsion ability, finiteelement*

1.Введение. Настоящей работой автор продолжает серию публикаций, посвящённых оценке основных ледовых качеств судов методами конечноэлементного моделирования.

В ряду ледовых качеств ходкость занимает первостепенное место, так как она определяет не только безопасность, но и эффективность эксплуатации судна во льдах. Ввиду принципиальной важности этого качества многими учёными предложены методики его оценки [3,4,6,12]. Ледовая ходкость описывает способность судна к передвижению во льдах. Традиционно она выражается зависимостью скорости его прямолинейного движения от параметров ледяного покрова: толщины, прочности (разрушенности), раздробленности, сплочённости, торосистости, заснеженности.

Применимость указанной трактовки данного ледового качества допустима при оценке эксплуатационных показателей работы судна. Однако опыт научной работы по оценке ледовых качеств судов внутреннего плавания убедил автора в том, что с точки зрения обеспечения безопасности (а именно вокруг этой проблемы сосредоточены его научные интересы) такое представление, по крайней мере, не полно хотя бы по двум следующим соображениям. В реальных условиях реакция судна на влияние льда и регулирующее воздействие со стороны рулевого комплекса изменяет его «идеальную» ходкость, так как оно приобретает ощутимую рыскливость. В практических целях важна оценка этого качества для

управляемого судна (при попытках удержания его в границах заданного маршрута плавания). Известные методики не позволяют сделать это.

Кроме этого обширный круг задач безопасности судоходства связан с анализом движения судна за относительно короткий интервал времени. Но даже прямолинейное движение в однородных льдах имеет неустановившийся характер. Поэтому в таких случаях прогноз безопасных условий с позиций усреднения параметров движения (что и предлагают традиционные решения) будет иметь низкую оправдываемость.

Значимым дополнением и уточнением классических подходов, а во многих случаях единственным средством решения подобных задач автор видит применение численных методов. Опыт использования конечноэлементного симулирования движения судна во льдах на базе современных вычислительных систем показывает, что при разумном сочетании степени дискретизации пространства (точности вычислений) и затрат времени на расчёты обеспечивается адекватность моделирования даже для относительно продолжительных процессов (~ нескольким минутам). Последнее позволяет оценивать целый ряд ледовых качеств судна, в том числе и его ледовую ходкость.

2.Моделирование. Для анализа ледовой ходкости была разработана конечноэлементная модель взаимодействующих тел и сред: судно, ледяное поле и вода (рис. 1).

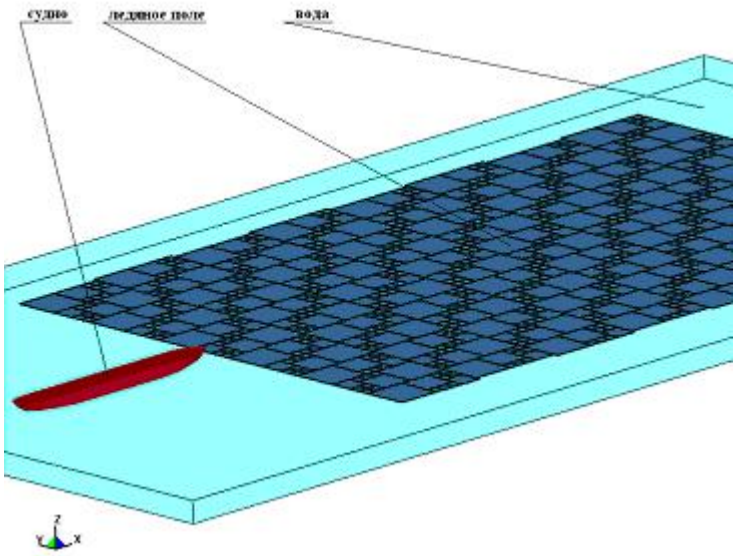


Рис. 1. Модель

В целях сопоставимости результатов численного и известных полуаналитических подходов моделировалось транспортное судно с традиционными обводами. При этом имеется ввиду наличие клинообразного носового заострения в плоскости конструктивной ватерлинии, V-образных носовых шпангоутов и цилиндрической вставки. Для описания судна использовалась Лагранжева оболочка из трёх и четырёхузловых элементов. Толщина элементов подбиралась из условия сохранения общей прочности корпуса. При таком способе не соблюдается равнозначность местной прочности, но здесь необходимо отметить, что при получении полуэмпирических зависимостей для ледовой ходкости их авторы вовсе пренебрегают деформациями корпуса [3,10]. Последнее упрощение не бесспорно (по крайней мере, для относительно высоких скоростей движения и неледокольных обводов судов) и потому требует проверки. Проверка эта связана с детализацией корпуса вплоть до отдельных конструкций. К сожалению, на данном этапе расчёт при такой степени дискретизации является «неприподъёмной» задачей для вычислительной системы автора.

Эквивалентом действия движительно-рулевого комплекса являлись узловые силы, зависящие от параметров движения судна [10].

Лёд и вода были сформированы набором восьмиузловых элементов объёмного типа в Лагранжевой и Эйлеровой формулировках соответственно. Общее количество элементов составляло в пределах 900 000 – 1 200 000 ед. в зависимости от варианта расчёта. Используемые модели материалов (сталь, лёд, вода), их физико-механические характеристики и алгоритмы контактного взаимодействия тел приведены в работах [5,13].

Основные параметры ледяного покрова выбирались исходя из ледового класса прототипа судна – «Лёд-40» («Ice-1»). При этом моделировалось поле мелкобитого льда как «регулярными» (равновеликими), так и «нерегулярными» (разновеликими) льдинами протяжённостью 5 – 20 м. Варьировались толщина льда (0,1 – 0,5 м), сплочённость (6 – 10 баллов), ширина ледовой трассы (~ 3 – 15 ширин судна), подвижки и сжатия льда (0 – 3 балла).

Осадка судна была постоянной и соответствовала его полной загрузке (максимальной массе).

3.Дискуссия. *Общие замечания.* Подавляющим видом эксплуатации флота (и особенно транспортного) в ледовых условиях является плавание в битых льдах. Статистика ледовой аварийности показывает, что более 90% повреждений судов связано с данным видом плавания. Поэтому оценка ледовых качеств транспортных судов в этих условиях является важной задачей обеспечения безопасности судоходства. Следует заметить, что для большинства судов, работающих на внутренних водных путях, ходкость во льдах как качество лимитирующее безопасность справедливо только для сильно сплочённых льдов (9-10 баллов). В более разреженной ледяной среде (сплочённостью менее 8 баллов) границы безопасных условий будут определяться прочностью корпусных конструкций.

Применительно к ледовой ходкости в битых льдах сейчас существует достаточное количество зависимостей для расчёта ледового сопротивления судна. Они базируются на полуэмпирических [1,9] или аналитических зависимостях [4,8,11] (каких-либо публикаций по численным решениям в конечноэлементной или иных подобных постановках автором не найдено). Классической в этом ряду следует признать работу [4]. В ней теоретически аргументированы составляющие ледового сопротивления, учтены основные ледовые условия, определяющие корпусные нагрузки: толщина, сплочённость, раздробленность, сжатия льда и ширина ледового канала. Теоретические положения, скорректированные обширным эмпирическим материалом, позволили получить сравнительно несложные расчётные формулы для морских судов. В статье [8] по данным натурных наблюдений эти зависимости адаптированы для речных судов с учётом их обводов и особенностей ледовых условий внутренних водоёмов. Позднее в трудах [10,11] предпринята попытка развить аналитические подходы для оценки составляющих ледовых усилий. Был расширен их круг, предложены универсальные интегральные зависимости, претендующие на звание теоретических основ не только ходкости, но и поворотливости судна во льдах.

Однако уже само многообразие этих решений говорит не в пользу их безупречности. Каждое имеет свои изъяны, в первую очередь проявляющиеся в весомых различиях расчётных ледовых нагрузок для сопоставимых условий. Расхождения в выборе аргументов предлагаемых зависимостей – другой признак несовершенства. Так, например, эти противоречия очевидны в отношении значимости влияния прочности и степени раздробленности мелкобитых льдов на ходкость судна.

Изобилие используемых корректирующих коэффициентов также указывает на недостатки традиционных методик. Последнее является результатом введения различных оговорок, упрощений, допущений, априорно принимаемых условий. При этом источники статистической информации для получения этих коэффициентов ограничены определённым

набором данных натурных или модельных испытаний. Поэтому попытки экстраполяции методик на иные условия или суда, как правило, приводят к некорректным результатам вплоть до их неприемлемости (Рис. 4).

Ниже приводится обзор основных недостатков полуаналитических методик, подтверждённых результатами численного эксперимента.

Идеальная и реальная ходкость. Основное ограничение всех традиционных методик заключается в «идеализации» ледовой ходкости, сводящей движение судна к абсолютно прямолинейному. Фактически из-за асимметрии ледовых нагрузок оно стремиться уйти в сторону от заданной маршрутной линии. Попытки удержания судна в допустимых границах по критериям безопасности плавания сопровождаются его зарыскиваниями. Их амплитуда и частота определяют реальную ледовую ходкость – скорость перемещения в заданном направлении. Очевидно, что реальная ходкость будет зависеть как от характеристик ледяного покрова, так и от эффективности управления судном. Причём второй фактор является доминирующим. Однако рыскливость судна во льдах не устранима даже при очень жёстком законе управления, обеспечивающем практическую прямолинейность движения для чистой воды. Рис. 2 поясняет это на примере моделирования движения судна в сплочённых «регулярных» льдах протяжённостью около 5,0 м.

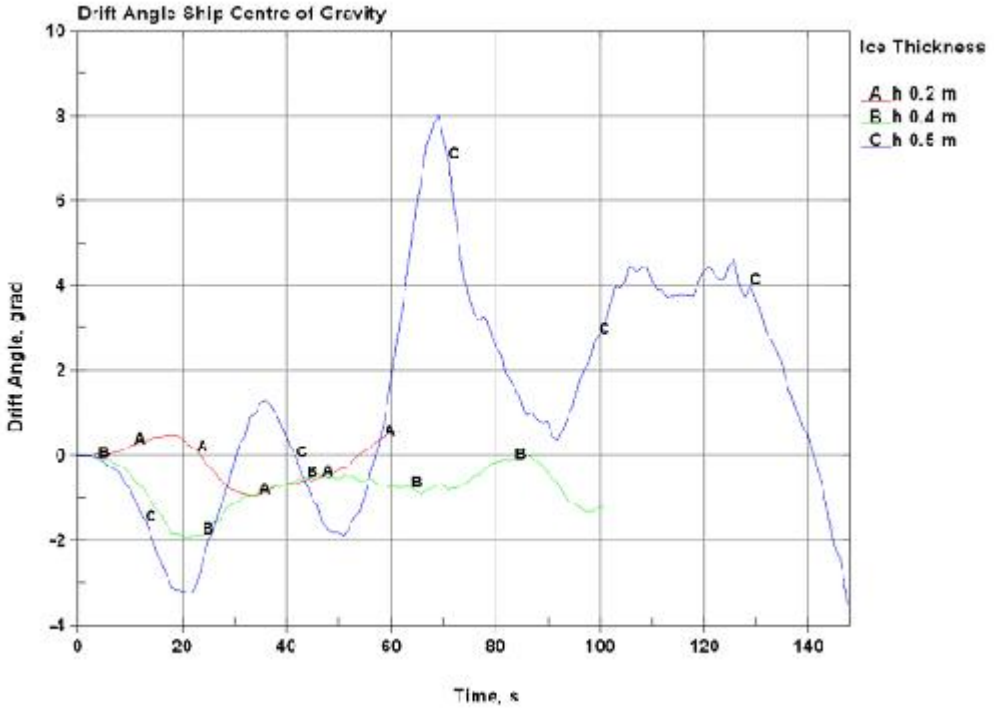


Рис. 2. Временная зависимость угла дрейфа по центру тяжести судна для различных льдов

Анализ кривых рис. 2 показывает, что амплитуда знакопеременного угла дрейфа увеличивается с ростом толщины льда. При малых значения толщин и высоких скоростях движения судна ледяной покров интенсивно разрушается корпусом, незначительно увеличивая рыскливость (кривая А для толщины льда 0,2 м). Но для более толстых льдов меняется характер их взаимодействия с судном. Моделирование показывает существенное уменьшение степени дробления льдин при возрастании нагрузок от их раздвигания и деформирования. При этом многократно падает продольная скорость судна, сила тяги винтов приближается к режиму «на швартовах», увеличивая эффективность рулевого комплекса. В результате – существенный рост угла дрейфа (кривая С для толщины льда 0,5 м) и связанные

с этим потери скорости хода в направлении маршрута по сравнению с прямолинейным движением. Данное утверждение хорошо иллюстрирует рис. 3.

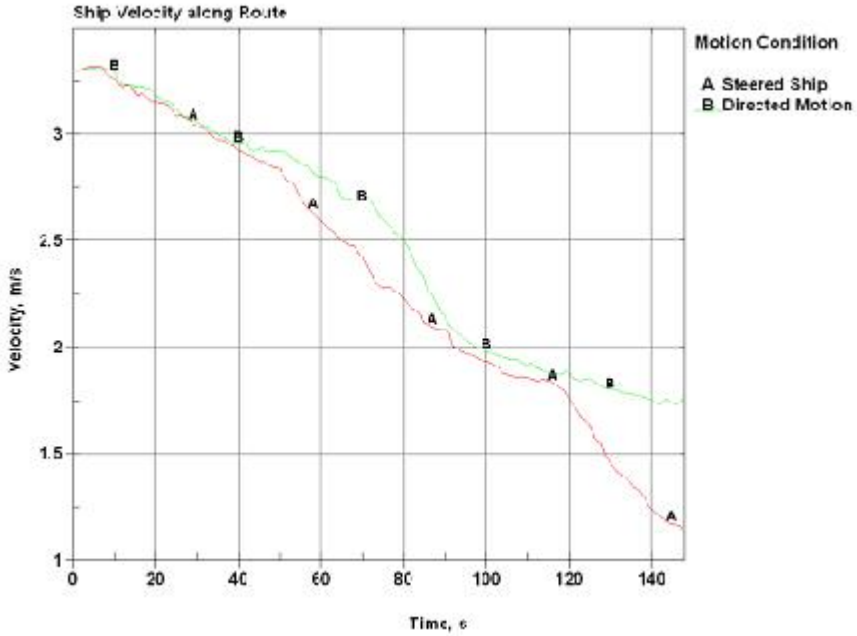
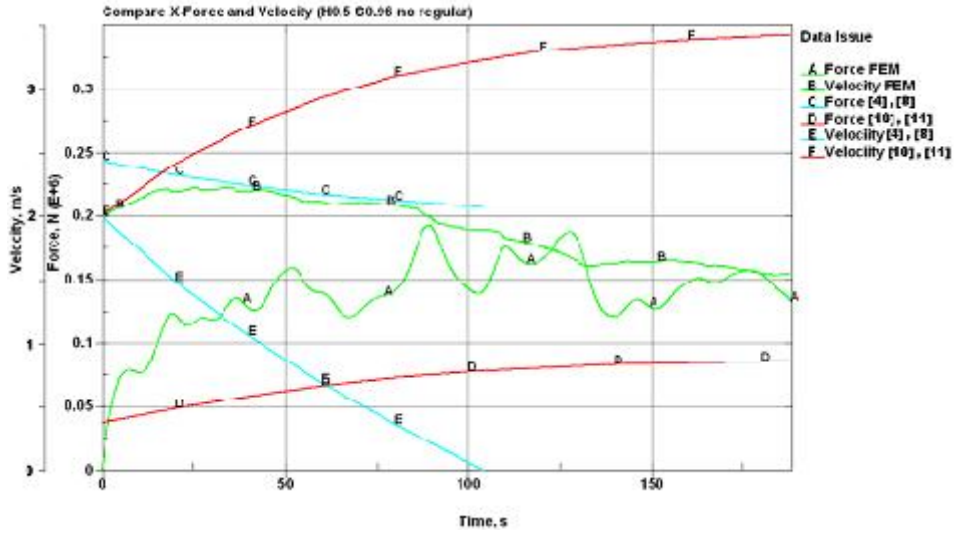


Рис. 3. Сравнение скоростей хода судна в битых льдах для различных режимов управления (А – управляемое судно; В – прямолинейно двигающееся судно)

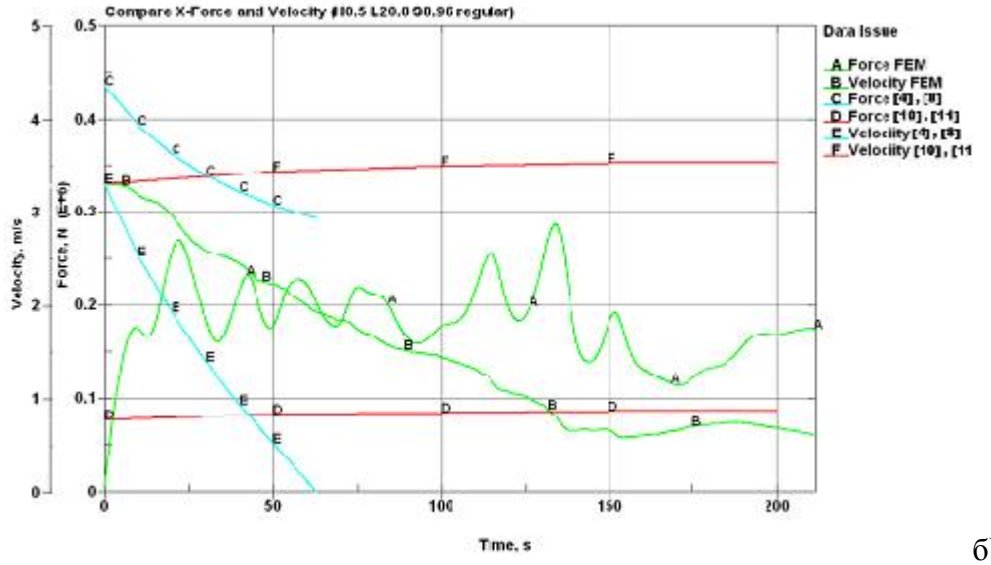
На нём показаны кривые скорости хода судна в сильносплочённых (9-10 баллов) мелкобитых (протяжённость льдин 5,0 – 6,0 м) льдах толщиной 0,5 м. Кривая А описывает движение реально управляемого судна, линия В – судна, идущего прямолинейно. Принципиальным отличием этих кривых является разница скоростей в конце расчётного временного интервала. Если у прямолинейно идущего судна скорость стабилизируется в пределах 1,75 – 1,85 м/с, то для управляемого она заметно ниже (1,13 м/с) и продолжает падать.

Частные задачи безопасности. Сопоставимость результатов. Опыт научной деятельности автора был неоднократно связан с экспертной оценкой последствий ледовых аварий судов внутреннего плавания. При этом для повышения достоверности выводов в достаточном ряде случаев эксперты вынуждены были прибегать к численному моделированию ситуации. Это, например, такие задачи, как оценка реакции судна на внедрение в ледяное поле при различных скоростях хода, на изменение в процессе движения ледовой обстановки, параметров ледового канала, на воздействие подвижек, дрейфа и сжатий льдов; расчёт инерционных характеристик судна; оценка навала льдов на счаленные и ошвартованные объекты и пр. Подобные процессы сравнительно непродолжительны, как правило, конкретизированы или оговорены дополнительными условиями, а решаемые задачи в конечном итоге сводятся к анализу ходкости или ледового сопротивления при указанных ограничениях. В известных методиках эти проблемы либо не разрешимы, либо решения на базе усреднённых значений ледовых усилий имеют недостоверный отклик. В качестве подтверждения этого на рис. 4 показаны временны***ы***е зависимости продольных ледовых корпусных усилий и скорости хода судна, полученные методом конечноэлементного моделирования, в сопоставлении с результатами расчётов этих параметров по методикам [4,8,10,11]. Расчётный вариант а) описывает вход и движение судна (немногим более трёх минут) в поле сплочённого мелкобитого «нерегулярного» льда толщиной 0,5 м. Вариант б) – в поле аналогичного «регулярного» льда при протяжённости льдин в пределах 20,0 м (около

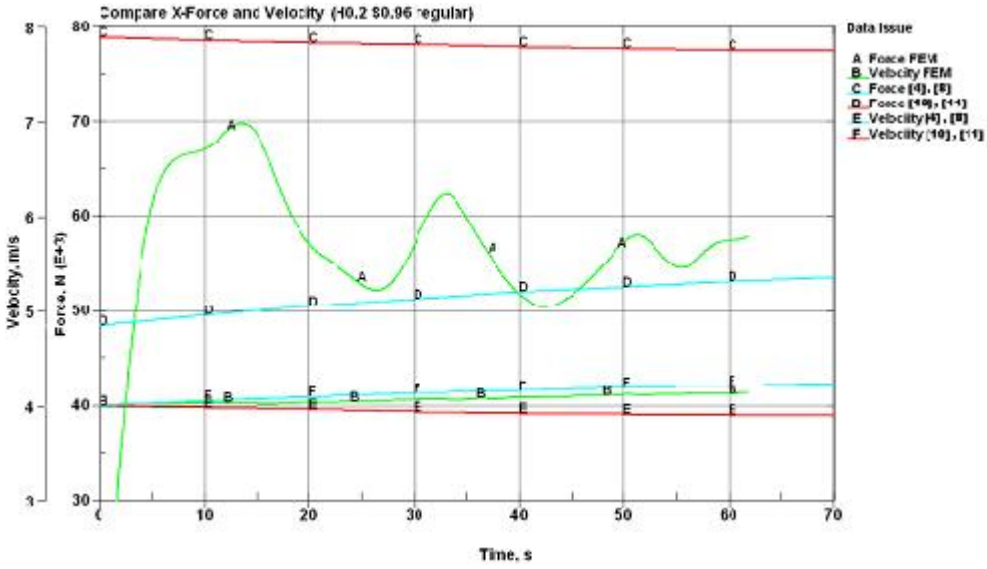
3,5 минут). Вариант в) – в поле «регулярного» льда толщиной 0,2 м с протяжённостью льдин 5,0 – 6,0 м (около одной минуты).



а)



б)



в)

Рис. 4. Сравнение зависимостей ледового сопротивления и скорости движения судна, рассчитанных по различным методам

Рассмотрение зависимостей рис. 4 выявляет немонотонность конечноэлементных кривых ледового сопротивления (на графиках показано сглаженное значение параметра, линии A) в отличие от функций, полученных на основе полуаналитических методик (кривые C и D). При этом зависимость ледовых нагрузок, рассчитанная по [10,11] (кривые D, рис. 4а, 4б), даёт явно заниженный уровень, что предрекает неадекватный разгон судна в анализируемых условиях (кривые F, рис 4а, 4б). Не лучший результат показывают и методики [4,10], прогнозирующие «заклинивание» судна на 104 с и 63 с для вариантов а) и б) соответственно (кривые E, рис. 4а, 4б). Численный эксперимент для варианта а) предсказывает сначала его незначительный разгон (до скорости около 2,2 м/с) и последующее замедление со стабилизацией в пределах 1,55 – 1,65 м/с (кривая B, рис. 4а). Вариант б) характеризуется более «тяжёлыми» ледовыми условиями, но и в этом случае согласно конечноэлементной модели судно способно непрерывно продвигаться со скоростью около 0,55 м/с (кривая B, рис. 4б).

С уменьшением толщины и горизонтальных размеров льдин возрастает степень доверия к методикам [10,11] (рис. 4в). Для тонких полей (менее 0,3 м) при протяжённости ледяных образований 5,0 – 6,0 м расчёты скорости по ним показывают результат близкий к модельному (кривая F, рис. 4в). Источники [4,8] демонстрируют примерно полуторакратное завышение ледовых нагрузок (кривая C, рис. 4в) и падение скорости (кривая E, рис. 4в), что не согласуется с натурными данными [11].

Следует отметить, что численный эксперимент предсказывает значительную временную изменчивость ледового сопротивления даже при сравнительно устойчивой скорости хода судна. В доказательство этого на рис. 5 приведён расчёт продольной ледовой нагрузки на корпусе судна в одном из вариантов моделирования.

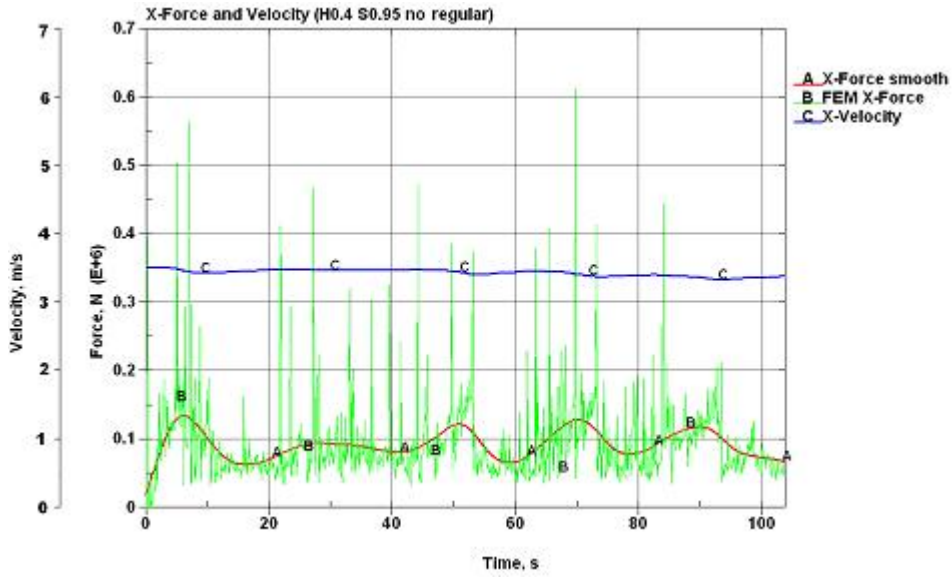


Рис. 5. Временная зависимость продольных ледовых усилий и скорости хода судна («нерегулярный» мелкобитый лёд; толщина – 0,4 м; сплочённость – 9-10 баллов)

Анализ функций рис. 5 показывает, что конечноэлементная модель прогнозирует значительную дисперсию ледовых сил (кривая B). При этом даже сглаженное значение этого параметра (кривая A) для относительно стабильной скорости движения 3,35 – 3,45 м/с (кривая C) отличает высокая неравномерность, что имеет место в действительности. Колебания сглаженной величины ледовых сил превышают 53% от её максимального значения.

Модель взаимодействия. Аналитические модели взаимодействия судна с мелкобитым льдом, реализованные в полуэмпирических методиках, базируются на предположениях

авторов о характере обтекания ледяной средой корпуса судна. Задача контакта сведена к двумерной в плоскости ледяного покрова. При этом для нахождения преобладающих составляющих ледовых нагрузок – инерционных (импульсивных) и диссипативных некорректно назначаются скорости среды, связывая их только с раздвиганием льда [4,7,10].

Фактически лёд не только раздвигается, но интенсивно деформируется и разрушается (рис.6).

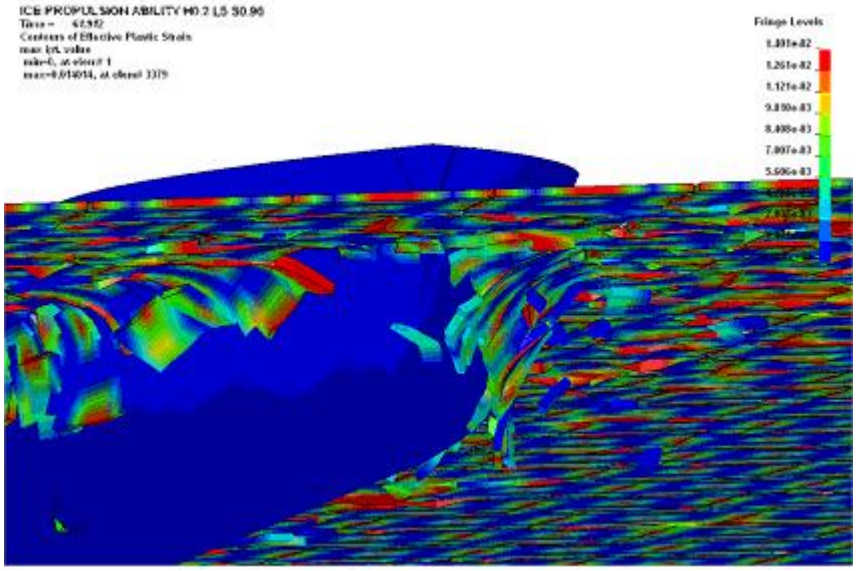


Рис. 6. Характер взаимодействия судна с мелкобитым льдом в поле пластических деформаций.

Последнее существенно изменяет теоретическую картину поля скоростей в ледяном покрове. В качестве примера на рис. 7 представлено распределение скоростей в траверзном сечении льда в районе первого теоретического шпангоута для двух произвольных моментов времени (23 с и 58 с).

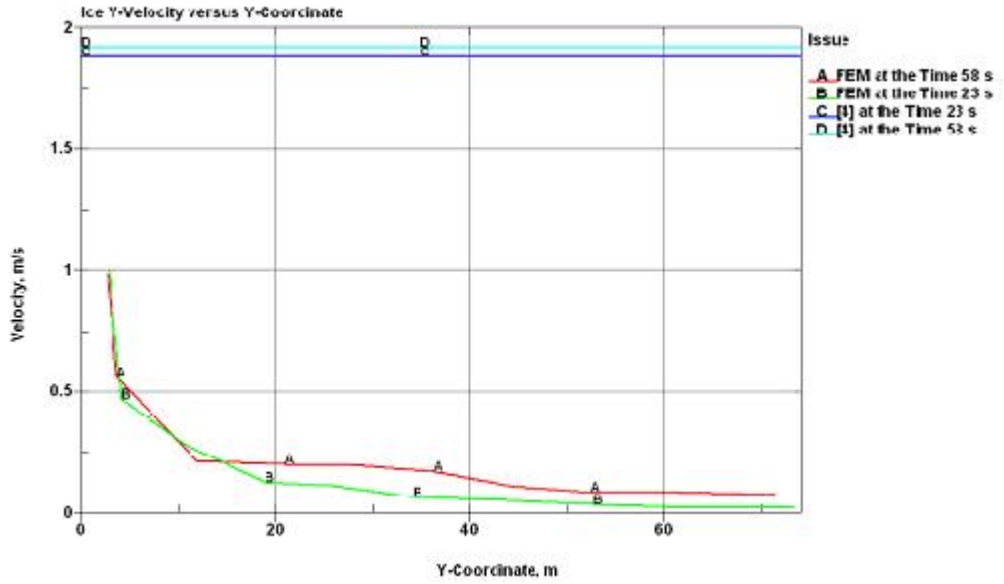
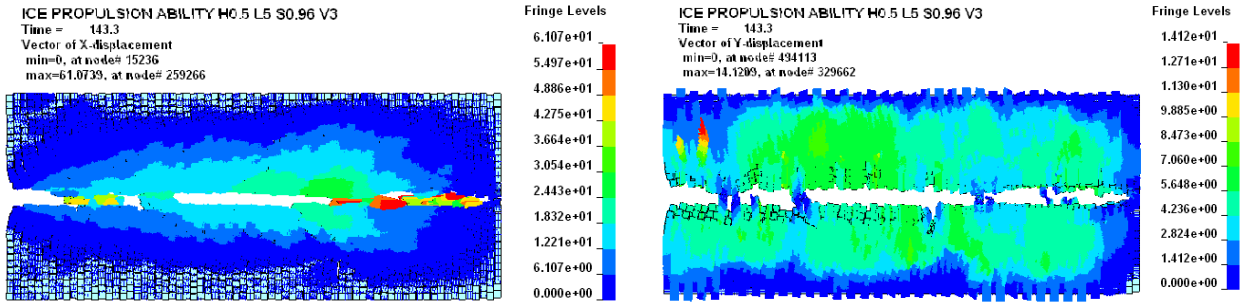


Рис. 7. Расчётное распределение скоростей в поперечном сечении ледяного покрова («регулярный» мелкобитый лёд; протяжённость льдин – 5,0 м; толщина – 0,2 м; сплочённость – 9-10 баллов)

Поведение линий C и D (рис. 7) указывает на то, что согласно методике [4] скорость льда в его плоскости для любого поперечного сечения не зависит от удалённости по траверзу. Но это противоречит результатам конечноэлементного моделирования. Кривые A и B демонстрируют значительное падение поперечной скорости среды с удалением от борта судна.

К аналогичным выводам можно прийти, анализируя работы [10,11], где в качестве расчётного аргумента используется нормальная к действующей ватерлинии скорость льда.

Не согласуются результаты численного эксперимента и с заявлениями авторов полуаналитических методик в отношении перераспределения перемещений в плоскости ледяного покрова. Так в [4] отмечено, что «… при движении в сплочённых мелкобитых льдах возмущение среды происходит в основном в направлении, перпендикулярном к диаметральной плоскости судна, и частично в направлении движения судна. Результаты многочисленных наблюдений, а также специально проведённые расчёты свидетельствуют о том, что перемещения льдин в направлении движения судна малы по сравнению с соответствующими поперечными перемещениями…». Численный эксперимент в большей части случаев показывает не только соизмеримость этих величин, но также и превышение продольного сдвига ледяной среды по отношению к её траверзному смещению (рис. 8).



а) б)

Рис. 8. Продольные а) и поперечные б) смещения масс льда в результате прохождения судна («регулярный» мелкобитый лёд; протяжённость льдин – 5,0 м; толщина – 0,5 м; сплочённость – 10 баллов; ширина канала ~ 160 м)

Из рис. 8б видно, что смещение основной массы льдов в поперечном направлении не превосходит 10 м. Продольный дрейф (рис. 8а) значительной части среды достигает 20 м и более.

Все полуаналитические зависимости получены в предположении свойств однородности, изотропности ледяной среды и сплошности её контакта с корпусом судна [4]. Согласно первому свойству, средняя плотность мелкобитого льда является постоянной величиной. Изотропность означает, что свойства среды не зависят от произвольно выбранного направления в её плоскости. Однако на практике эти условия далеко не всегда выполняются, что приводит к эффектам противоположным прогнозу традиционных методик. Часто это проявляется в нарушении теоретического баланса скорости судна и его ледового сопротивления, согласно которому ледовые усилия находятся в квадратичной зависимости от скорости движения. Так, например, эта взаимосвязь не однозначна для толстых (более 0,4 м) мелкораздробленных сплочённых льдов. Здесь при возмущении ледяной среды подвижным судном образуются локальные зоны её торошений и наслоений, чередующиеся с разводьями. Подобное явление упомянуто в работе [7] и подтверждается численным экспериментом (рис. 9). Сплочённость, а частично и толщина льда перераспределяются, приводятся в движение его большие массы, что порождает рост ледового сопротивления при снижении скорости хода судна. Это проиллюстрировано на рис. 10.

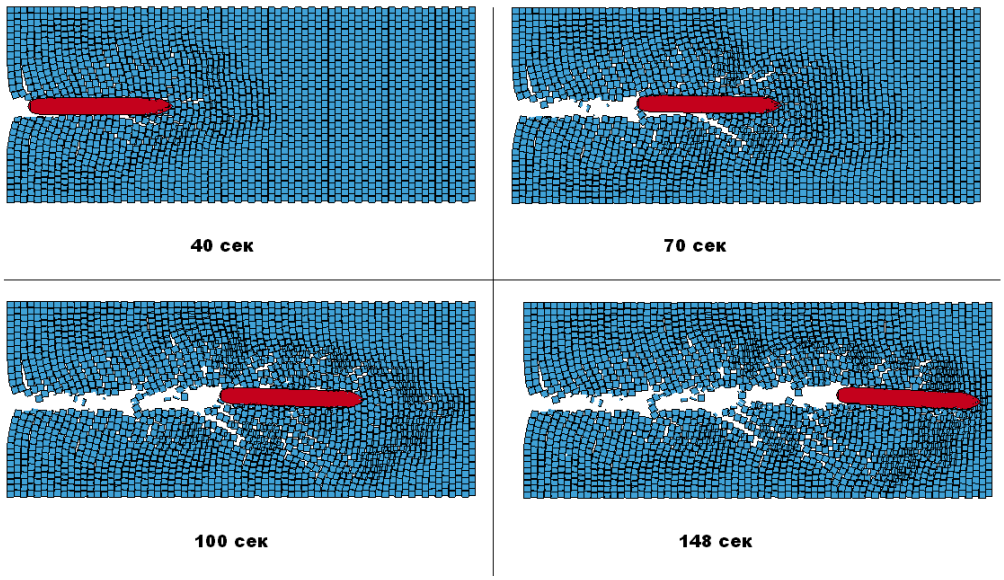


Рис. 9. Качественная картина движения судна в битых льдах («регулярный» мелкобитый лёд; протяжённость льдин – 5,0 м; толщина – 0,5 м; сплочённость – 10 баллов)

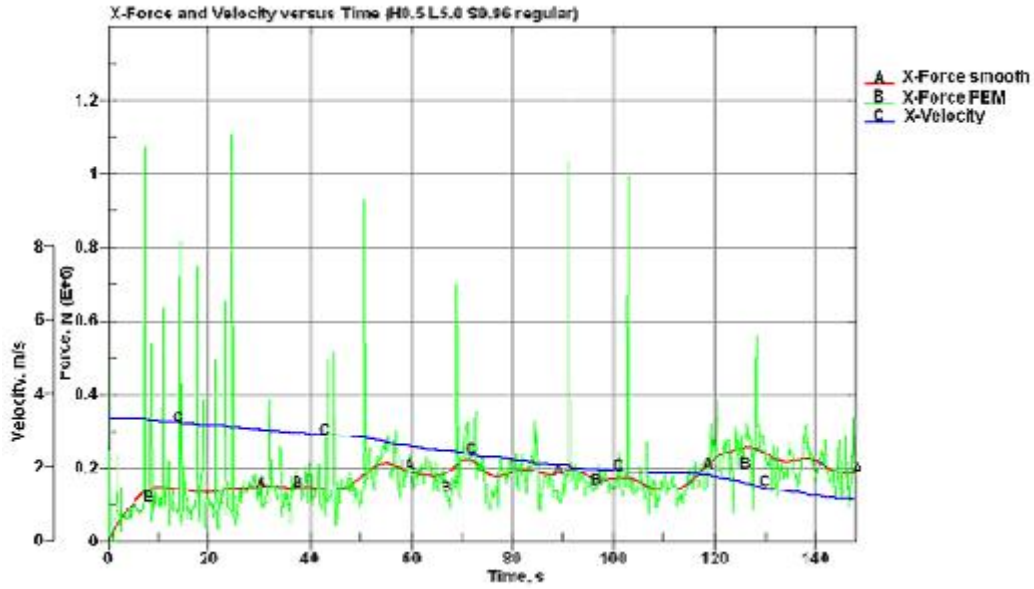


Рис. 10. Сравнение временны*х* зависимостей ледового сопротивления и скорости движения судна («регулярный» мелкобитый лёд; протяжённость льдин – 5,0 м; толщина – 0,5 м; сплочённость – 10 баллов)

Анализ кривых рис. 10 показывает хотя и не монотонное, но увеличение ледовой нагрузки (сглаженное значение, кривая А) при почти троекратном устойчивом падении скорости (кривая С) к окончанию моделируемого периода.

При движении в тонких льдах качественные признаки образующейся неравномерности параметров среды явно не выражены. Однако в ряде случаев здесь также зафиксировано несоответствие экспериментальной кривой «скорость движения – ледовое сопротивление» её теоретическому аналогу. Так на рис. 11 описан эпизод форсирования с полного хода перемычки из мелкобитого «нерегулярного» льда толщиной 0,2 м. Из анализа кривых видно, что плавное замедление хода судна в 1,3 раза (кривая С) практически не сказывается на уровне продольных ледовых нагрузок, оставляя их в пределах ~100 кН (сглаженное значение, кривая В).

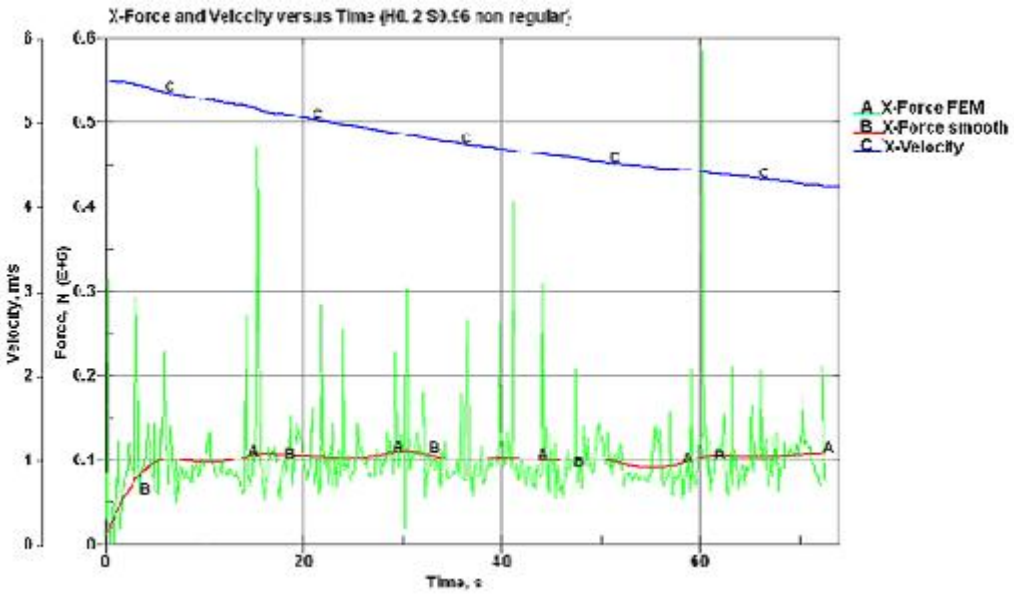


Рис. 11. Сравнение временны*ы*х зависимостей ледового сопротивления и скорости движения судна («нерегулярный» мелкобитый лёд; протяжённость льдин – 5,0-20,0 м; толщина – 0,2 м; сплочённость – 10 баллов)

Необходимо отметить временный характер таких явлений. Продолжительность их занимает несколько минут. Но в задачах безопасности судоходства – это значимый период. Кроме того, плавание во льдах, по сути, представляет череду ускорений и замедлений движения судна.

В структуру всех традиционных зависимостей расчёта ледового сопротивления судна входит постоянная составляющая (статическая, не зависящая от скорости движения). Однако её значения по данным различных источников далеки от согласия. Для сопоставимых условий верхние границы оценок [4] отличаются от нижних [10] более чем на порядок. Это свидетельствует об отсутствии надёжных натурных данных, подтверждающих методические положения авторов.

В рамках настоящей работы предпринята попытка оценить вклад данной составляющей. При этом для нескольких вариантов ледовых условий было смоделировано движение судна с очень малой скоростью – 0,1 м/с. Выбор предела скорости в первую очередь обусловлен возможностями вычислительной системы автора – за разумное время нужно было получить достаточное для анализа перемещение судна. Для данной скорости разница между чистым ледовым сопротивлением и его статической составляющей не превышает 2% [10,11], что вполне допустимо для приближённой оценки последней. Результаты расчётов продольных ледовых нагрузок по одному из вариантов показаны на рис. 12.

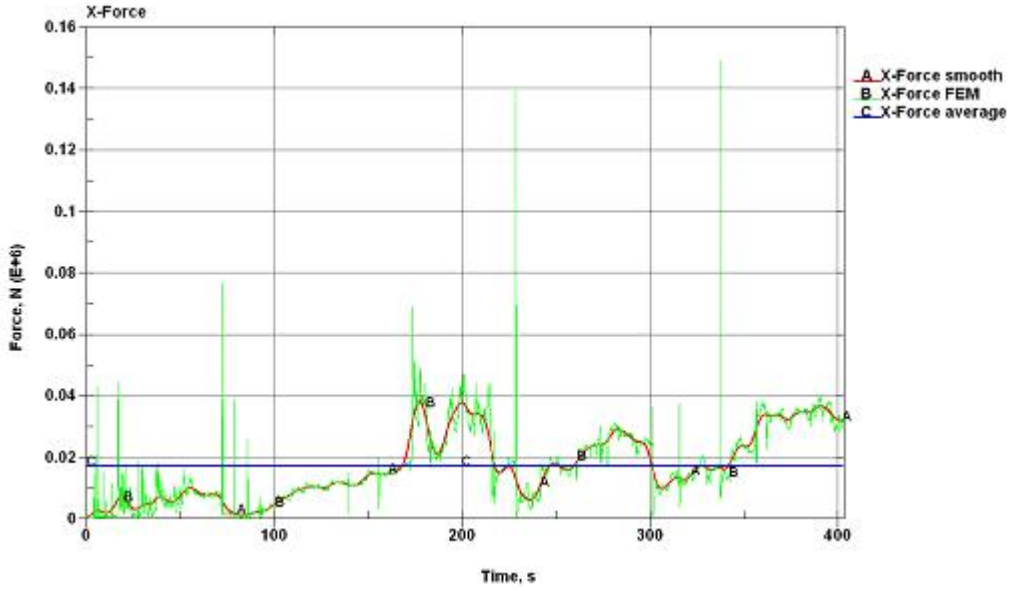


Рис. 12. Временн***а***я зависимость ледового сопротивления
(«нерегулярный» мелкобитый лёд; толщина – 0,5 м; сплочённость – 9-10 баллов)

Поведение кривых ледового сопротивления (рис. 12, В – расчёт, А – сглаженные значения) свидетельствует о его сильной временной изменчивости. Но если следовать логике авторов классических методик, то для практически незначимой фиксированной скорости хода сопротивление должно быть близко к постоянной величине. Поэтому статическую составляющую здесь следует интерпретировать как среднее значение кривой сопротивления (рис. 12, линия С). Причём применение полученного значения справедливо в понятии только как «потенциальная сопротивляемость ледяного покрова для ***неподвижного*** судна».

Корректность экстраполяции постоянной составляющей на подвижное судно (для разных скоростей, но тех же расчётных морфометрических характеристик льдов) сомнительна. Об этом свидетельствуют как вышеприведённые результаты численных расчётов, так и следующее наблюдение. При низких скоростях хода судна лёд в большей степени успевает раздвигаться, уплотняться, перераспределяться по площади канала. Высоким значениям скорости свойственно интенсивное деформирование и разрушение льдин в окрестностях судна. То есть скорость судна сказывается на свойствах ледяной среды. В рамках известных методик это влияние учесть невозможно, его можно только смоделировать. Поэтому отождествление неподвижной и по-разному возмущённой среды, выраженное в наличии статической составляющей, нельзя признать правомерным (по крайней мере, применительно к краткосрочным задачам безопасности).

Подобные разногласия с традиционными оценками ледового сопротивления еще раз подтверждают ограниченность последних для обоснования безопасных условий судоходства во льдах.

Подавляющее большинство авторов сводит оценку ледовой ходкости к расчёту чистого ледового сопротивления судна, полагая при этом его гидродинамические характеристики во льдах аналогичными для свободной воды. В общем случае такой приём несправедлив, но аналитически эта проблема пока не разрешена, что дополнительно снижает достоверность известных методов.

Сплочённость льда и ходкость. Сплочённость битых льдов наряду с их толщиной стоит в ряду основных факторов, определяющих ходкость судна. Это признаётся всеми авторами известных полуаналитических и эмпирических методик, но количественные

характеристики этого влияния неудовлетворительно согласуются как между собой, так и с результатами численного моделирования.

В качестве примера для «регулярных» мелкобитых льдов протяжённостью 5,0 м и толщиной 0,5 м на рис. 13 показаны расчётные временны*е* зависимости скорости хода судна, полученные согласно методикам [4,8,10,11], в сравнении с модельными кривыми.

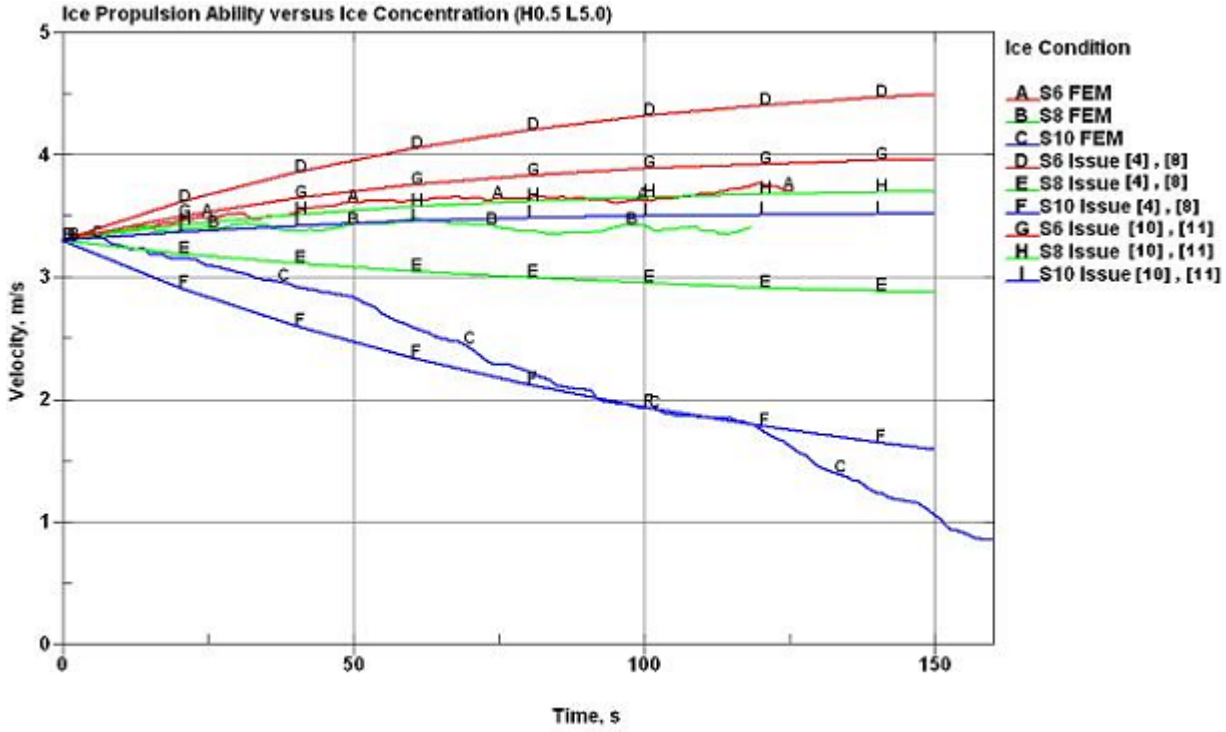


Рис. 13. Влияние сплочённости мелкобитых льдов на ходкость судна

Для разреженных льдов сплочённостью 6 баллов поведение аналитических зависимостей (рис. 13, D – для методик [4,8], G – для методик [10,11]) аналогично численной кривой – A. При этом для расчётного периода времени характерен рост скорости движения с её последующей стабилизацией. Однако аналитические функции демонстрируют явно завышенный результат. Так превышение в скорости стабилизации по отношению к уровню конечноэлементной кривой колеблется в пределах 10% - 22%.

В сплочённых льдах (8 баллов) согласно численному эксперименту ход судна практически не изменяется (3,3 м/с – 3,35 м/с, рис. 13, кривая B). Методики [10,11] (рис. 13, кривая H) по-прежнему предсказывают рост скорости, а методики [4,8] (рис. 13, кривая E) напротив – её падение. При этом разница между аналитически полученными скоростями стабилизации и прогнозом модели сохраняется на уровне 13% - 15%.

Для сильносплочённых льдов (9-10 баллов) методики [10,11] (рис. 13, кривая I) дают неприемлемый результат. Он проявляется в неадекватном ускорении судна (хотя и незначительном) и почти четырёхкратном завышении скорости стабилизации. Заметно лучше согласуются с численным экспериментом (рис. 13, кривая C) расчёты по методикам [4,8] (рис. 13, кривая F). Но и в этом случае расхождение в скоростях стабилизации превышает 70%.

Прочность льда и ходкость. Согласно принятой классификации характеристик ледяного покрова его прочность по стадиям таяния характеризует параметр, именуемый разрушенностью. Вопрос о влиянии прочности мелкобитого льда на ходкость судна для автора настоящей статьи оставался открытым до начала использования им в инженерных и научных целях CAE-систем. Оправданием тому служило отсутствие достоверных данных о

таком влиянии и наличие разногласий по этому поводу в известных трудах. Так авторы работ [10,11] даже не упоминают об этом аргументе, в [7] высказано утверждение (согласующееся с более ранними работами) о практической незначимости данного влияния.

В противовес сказанному в статье [8] в зависимость для расчёта продольных ледовых нагрузок на корпусе транспортного судна введён эмпирический коэффициент, учитывающий разрушенность битых льдов. В работе [2] для оценки ледового сопротивления ледокольного судна в аналогичных условиях в явном виде используется прочность льда на изгиб.

Автором проведён расчёт серии вариантов движения судна в мелкобитых льдах различной прочности. Варьировались пределы текучести и прочности льда в интервале 90% - 50% от значений, принятых в работе [5]. При этом несущественно колебался модуль упрочнения, упругие константы льда оставались неизменными. Согласно классификации льдов внутренних водоёмов это соответствует их разрушенности в пределах 1 – (3-4) балла. Характерные результаты моделирования показаны на рис. 14.

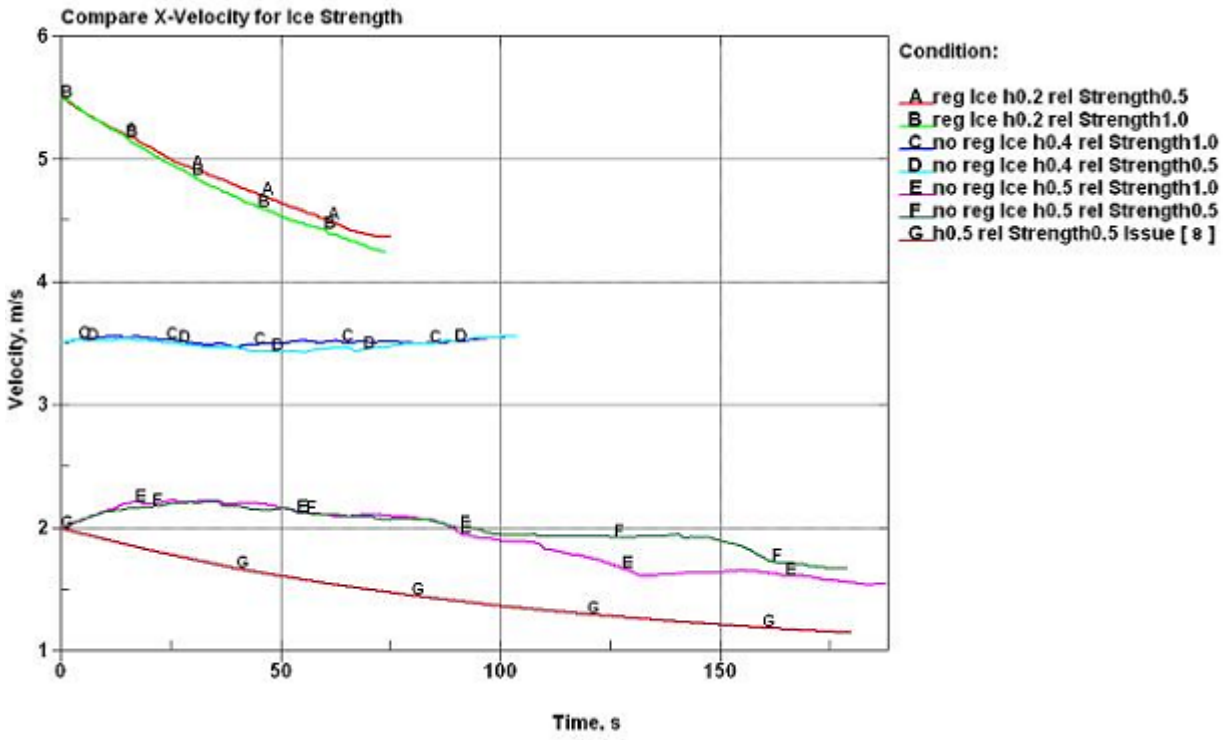


Рис. 14. Влияние прочности мелкобитого льда на ходкость судна

Кривые B, C и E (рис. 14) описывают временную зависимость скорости судна в мелкобитых прочных зимних льдах различной толщины и раздробленности. Кривые ходкости A, D, F получены для тех же морфометрических характеристик льда при его разрушенности 3-4 балла (что соответствует относительной прочности 0,5). Сопоставление соответствующих пар функций (A и B; C и D; E и F) демонстрирует расхождения между ними. Но разница эта нестабильна и невелика, в среднем составляя 2% - 5%.

В реальных условиях эксплуатации разрушенность льдов, как правило, имеет меньшую величину. Кроме того следует отметить, что в большей степени эта характеристика является качественной, нежели количественной. Оценивается она визуально по внешним признакам состояния льда (определяющую роль при этом играет опыт наблюдателя) и уже поэтому не может претендовать на объективность. Таким образом, в отношении связи прочности мелкобитых льдов и ходкости судна результаты конечноэлементного моделирования полностью подтверждают выводы авторов работы [7] – ею можно пренебречь.

Для сравнения на рис. 14 также показана кривая G, полученная согласно методике [8] и характеризующая поведение скорости судна во льдах разрушенностью 3-4 балла, морфометрически однотипных вариантам E и F. Её численный аналог (кривая F) располагается выше на 35% - 55%, что нельзя признать в качестве удовлетворительной сходимости результатов численных и аналитических решений в отношении учёта прочности льда.

Раздробленность льда и ходкость. Применительно к битым льдам раздробленность характеризует степень их измельчения. Её можно выразить величиной средней протяжённости примерно равновеликих льдин, доминирующих на данном участке ледовой трассы (в ледовом канале).

В естественных условиях при достаточно длинных маршрутах этот параметр обладает существенной изменчивостью. По этой причине почти все авторы при расчётах эксплуатационной ледовой ходкости не используют раздробленность в качестве аргумента в предлагаемых зависимостях. Их методики построены на основе сильно усреднённых натурных или модельных данных [11]. Однако такой подход нельзя признать справедливым при решении задач безопасности. Неучёт раздробленности льдов для локальных зон порождает дополнительные ощутимые ошибки в оценке движения судна. Об этом свидетельствуют результаты конечноэлементного моделирования, представленные на рис.15.

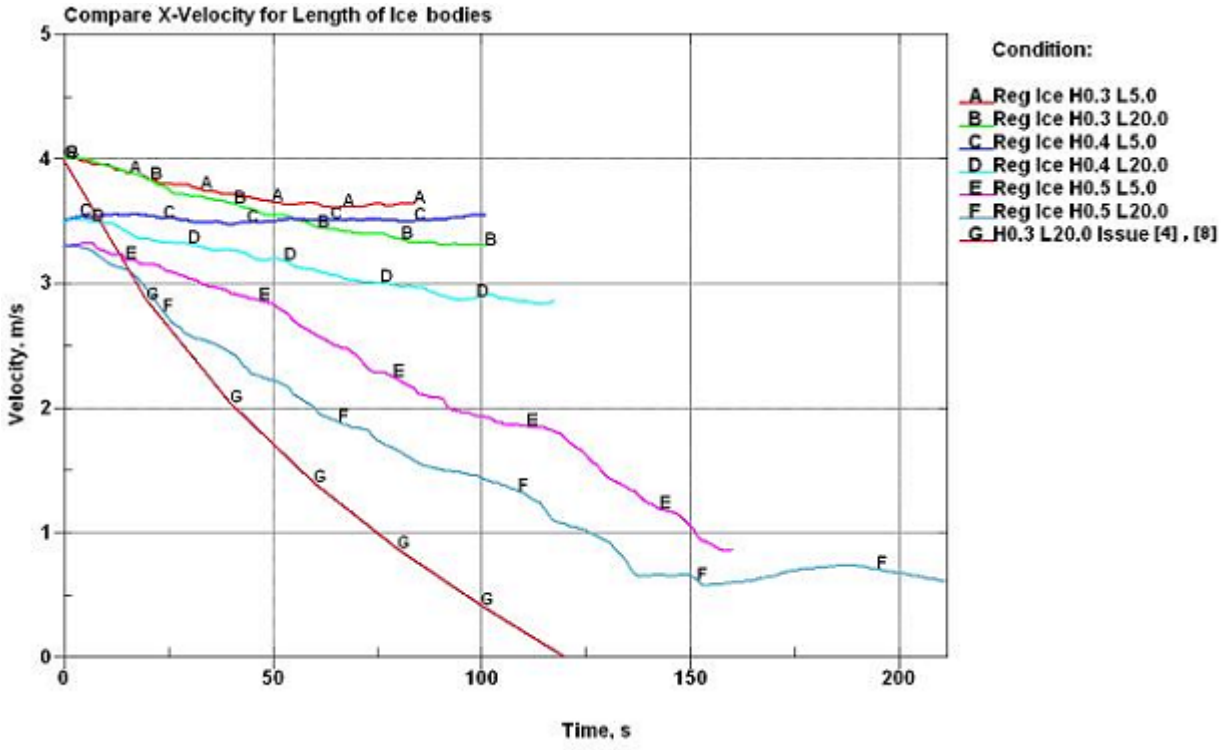


Рис. 15. Влияние раздробленности мелкобитого льда на ходкость судна

Кривые A, C и E (рис. 15) описывают движение судна в поле мелкобитого льда толщиной 0,3 м; 0,4 м и 0,5 м соответственно при средней протяжённости льдин 5,0 м. Линии B, D, F – в аналогичном поле при протяжённости льдин 20,0 м. Попарное сопоставление кривых (A и B; C и D; E и F) показывает наличие расхождений, выражающихся в значимом ускорении хода с уменьшением протяжённости льдин. Так к моменту установившегося движения прирост скорости колеблется в пределах 10% - 45% в зависимости от толщины льда.

Кривая G (рис. 15), иллюстрирующая результаты расчёта ходкости по методикам [4,8] для льдов варианта В, предсказывает «заклинивание» судна на 120 с, не согласуясь как с результатами численного эксперимента, так и натуры.

Ширина ледового канала и ходкость. Большинство известных полуаналитических и эмпирических зависимостей для расчёта сопротивления битого льда движению судна получены в предположении свободно дрейфующих льдов не стеснённых кромками припая. На практике проводки флота часто осуществляются в границах ледовых каналов различной ширины. При этом эффект стеснения акватории начинает сказываться на ходкости судов.

Рядом авторов предприняты попытки оценить влияние этого стеснения на ледовые корпусные нагрузки [4,8,9]. Качественные результаты такой оценки сводятся к тому, что с уменьшением ширины ледового канала растёт ледовое сопротивление и ухудшается ходкость судна. Однако далеко не единичные численные опыты, поставленные автором настоящей работы, показали результаты, вносящие сомнения в однозначность такой связи, что нельзя игнорировать при решении задач безопасности. В качестве примера на рис. 16 показаны результаты моделирования движения судна в каналах различной ширины, заполненных мелкобитыми «регулярными» льдами протяжённостью 5,0 м, толщиной 0,5 м и сплочённостью 9-10 баллов.

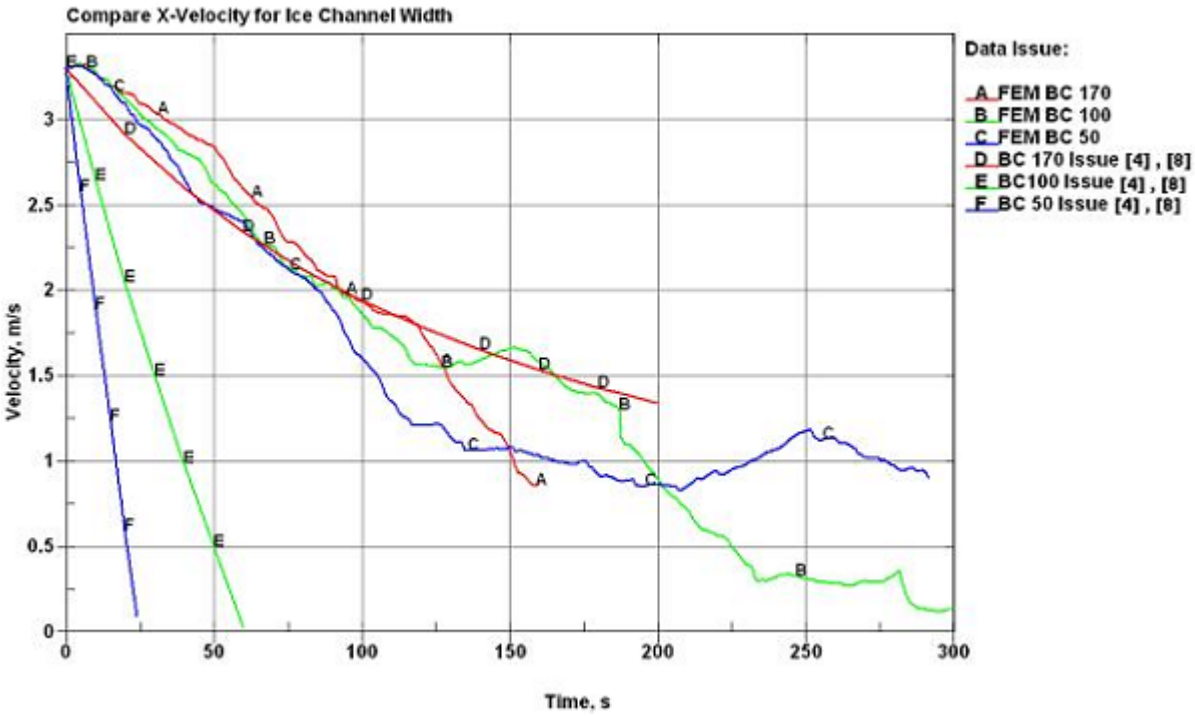


Рис. 16. Влияние ширины ледового канала на ходкость судна

Модельные кривые А, В и С (рис. 16) описывают временн***ы***е зависимости скорости движения судна в каналах шириной 170 м, 100 м и 50 м соответственно. Как видно, они демонстрируют не только существенные количественные, но и качественные различия с их полуаналитическими аналогами, полученными по методикам [4,8] (рис. 16, линии D, E, F).

4.Выводы

1. Применение известных полуаналитических методик оценки ходкости судов в мелкобитых льдах допустимо для решения задач эксплуатационно-экономического характера. При этом следует учитывать ограничения по ледовым условиям и типам судов, на базе которых эти методики получены.

2. Учёт ходкости судов во льдах с позиций обеспечения безопасности судоходства требует более дифференцированных подходов, реализация которых на данном этапе аналитически невозможна. Поэтому использование здесь упомянутых методик, как правило, некорректно.
3. При отсутствии репрезентативных натурных данных по ледовой ходкости в качестве источника достоверной статистической информации и средства адекватного решения конкретных задач безопасности следует признать численный эксперимент (например, в конечноэлементной постановке).

Литература

1. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение. 1986. 207 с.
2. Зуев В.А., Рыбаков В.К. Особенности плавания ледоколов в условиях мелководья. // Проектирование, теория и прочность судов, плавающих во льдах: Межвузовский сборник научных трудов / Нижегородский политехнический институт. Н.Новгород, 1992. – с. 34-39.
3. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с., ил.
4. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
5. 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
6. Рунеберг Р.И. О пароходах для зимнего плавания и ледоколах / Пер. с англ. СПб., 1890.
7. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. – Л.: Судостроение, 1980. – 208 с., ил. – ИСБН.
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. Солдаткин О.Б. Влияние ширины ледового канала на сопротивление движению транспортного судна // Сбор. науч. тр. ГИИВТА. Маневрирование судов в сложных условиях плавания. Горький, 1988. Вып. 254. с. 108 – 114.
10. Тронин В.А. Определение ледовых усилий, действующих на корпус судна при криволинейном движении // Сбор. науч. тр. ГИИВТА. Маневрирование судов в сложных условиях плавания. Горький, 1988. Вып. 254. с. 3 – 91.
11. Тронин В.А., Поляков А.С. Расчёт ледового сопротивления судна при прямолинейном движении в битом льду // Сбор. науч. тр. ГИИВТА. Маневрирование судов в сложных условиях плавания. Горький, 1988. Вып. 254. с. 92 – 107.
12. Шиманский Ю.А. Условные измерители ледовых качеств судов // Сб. науч. тр. ААНИИ. 1937. т. 130. 125 с.
13. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – p 498.

Поступила: 01.09.11.