

УДК 656.621/.626

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ЛЕДОВЫХ КАЧЕСТВ СУДНА. УПРАВЛЯЕМОСТЬ

© Василий Алексеевич Лобанов

*Волжская государственная академия водного транспорта*

*Нижний Новгород, Россия*

[lobbas@kis.ru](mailto:lobbas@kis.ru)

*Аннотация.* В рамках данной работы выполнена серия опытов по конечноэлементному моделированию криволинейного движения судна в различных ледовых условиях. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными данными, рассчитанными с использованием аналитических методик. Отмечены значимые различия классических и численных методов в оценках маршрутной устойчивости и поворотливости судов во льдах. Сделан вывод о неадекватности традиционных методик при решении задач, связанных с анализом ледовой управляемости судов.

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

## NUMERICAL EVALUATION OF ICE VESSEL PERFORMANCES. CONTROL ABILITY

© V.A.Lobanov

*Volga State Academy of Water Transport, Nizhniy Novgorod, Russia,*

*Abstract.* Within the framework of the given article a series of experiences on finite element to simulation of a curvilinear motion of a vessel in different ice conditions is executed. The comparative analysis of the obtained outcomes with the analogous datas calculated with use of analytical methods is lead. Significant differences classical and numerical methods in evaluations of routing stability and turning ability of vessels in ice are marked. The output about inadequacy of traditional methods is made at a problem solving, the bound with the analysis of ice controllability of vessels.

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

**1. Введение.** Настоящая статья продолжает серию публикаций, посвящённых сравнительному анализу численных и известных полуэмпирических методик оценки основных ледовых качеств судов внутреннего плавания [2,3].

Управляемость судна характеризует его способность перемещаться по заданной траектории. Она объединяет в себе два противоречивых качества – устойчивость на курсе и поворотливость. Речные судоходные пути отличаются ограниченными габаритами и повышенной кривизной судоходных трасс. Поэтому для судов, эксплуатирующихся в подобных условиях, основное внимание традиционно уделяется расчётам и обеспечению поворотливости. Однако при плавании в крупных водохранилищах, озёрах, прибрежных морских районах немаловажное значение приобретает устойчивость на курсе. Последнее требует поддержки для речных судов некоторого разумного сочетания этих качеств.

Научная деятельность автора связана с решением проблем обеспечения безопасности ледового судоходства на внутренних водных путях. В первую очередь это актуально для транспортного флота, как правило, имеющего разрешение Российского Речного Регистра для эксплуатации только в мелкобитых льдах. Анализ ледовой аварийности показывает, что подавляющее количество повреждений судов связано именно с данным видом плавания. Если для чистой воды существует достаточное количество апробированных способов расчёта управляемости, то применительно к упомянутым ледовым условиям можно утверждать об отсутствии адекватных полуаналитических методик оценки названных качеств. Поэтому при невозможности проведения полномасштабных натурных испытаний

единственным путём надёжного прогнозирования управляемости судна во льдах представляется реализация численных экспериментов (например, в конечноэлементной постановке).

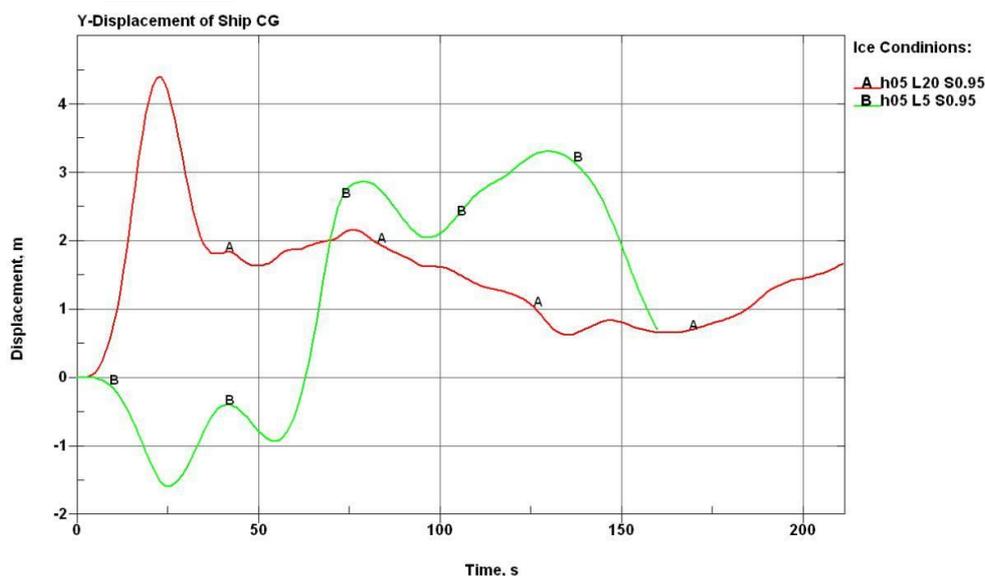
Для иллюстрации этого автором выполнена серия подобных экспериментов на базе модели, описанной в работе [2].

**2. Устойчивость на курсе.** В традиционном определении устойчивость на курсе – это способность управляемого судна сохранять прямолинейное движение. Это определение можно интерпретировать как способность судна возвращаться на выбранный курс при действии некоторого внешнего возмущения. Однако для судоводителя, обеспечивающего проводку, более важна *способность регулируемого судна возвращаться на заданную линию маршрута (створную линию)*. Поэтому с позиций безопасности устойчивость следует рассматривать именно в последней трактовке. При этом автором введён термин – *маршрутная устойчивость судна*.

Её нельзя отнести к теоретически изучаемым, описываемым, а, тем более, нормируемым ледовым качествам судна. Анализ этого качества на основе аналитических подходов представляет собой достаточно сложную задачу и попытки её решения, как показывает опыт, пока безуспешны. Априорно принимаемые допущения, сопутствующие таким методикам, с точки зрения безопасности сводят их до уровня неадекватности. Для решения задач определения безопасных условий ледового судоходства, многие упрощения нельзя признать корректными. Здесь ответа требует следующий вопрос: «Как при заданном режиме управления в конкретной ледовой обстановке будет вести себя судно?». Адекватный ответ чаще не согласуется с предположениями теоретических методик. При рассмотрении подобных проблем (обычно кратковременных) процесс движения судна следует рассматривать с позиций обязательного учёта пространственно-временной неустойчивости факторов (и особенно для внутренних судоходных водоёмов): раздробленности льдов, их сплочённости и толщины, ширины и формы ледового канала, формы и длительности контактных импульсов льдин, суммарных нагрузок на корпус со стороны льдов, скорости движения, закона управления судном и пр. [2,3].

В небольшом ряду теоретических оценок курсовой устойчивости классической является работа [8]. В ней получено выражение для среднего числа рысканий судна за единицу времени в предположении плоского без бокового сноса равномерного движения судна в однородных «регулярных» льдах. Кроме того принято, что стохастический процесс, вызывающий отклонения судна от прямого курса, является гауссовым. Выводы теоретического решения [8] лишь частично получили подтверждение по данным натурных испытаний курсовой устойчивости судов применительно к задачам эксплуатационного характера [1,5] и неприемлемы для решения проблем обеспечения безопасности плавания.

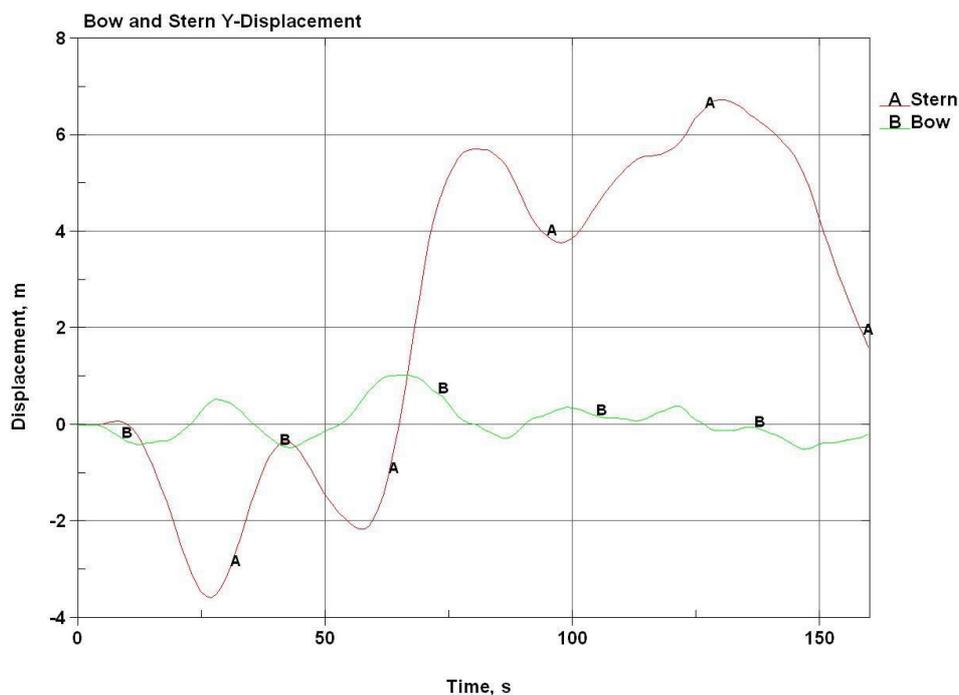
Ниже приводятся несколько примеров численного моделирования, явно противоречащих исходным установкам [8]. Так в отношении поперечного смещения можно утверждать, что оно неустранимо даже при очень «эффективном» (жёстком) управлении судном. Рис. 1 иллюстрирует это на примере двух расчётных вариантов движения судна в мелкобитых льдах различных характеристик.



**Рис. 1.** Поперечное смещение центра тяжести судна при движении в мелкобитых льдах

Вариант А (рис. 1) описывает плавание судна в сильносплочённых «регулярных» мелкобитых льдах толщиной 0,5 м при средней протяжённости льдин около 20,0 м. Кривая В (рис. 1) относится к движению в ледяной среде с аналогичными параметрами льда при протяжённости льдин 5,0 м. Как видно из анализа зависимостей, боковое смещение судна принимает ощутимые величины, пренебрегать которыми некорректно. Примечателен и тот факт, что оно не всегда знакопеременно (кривая А, рис. 1).

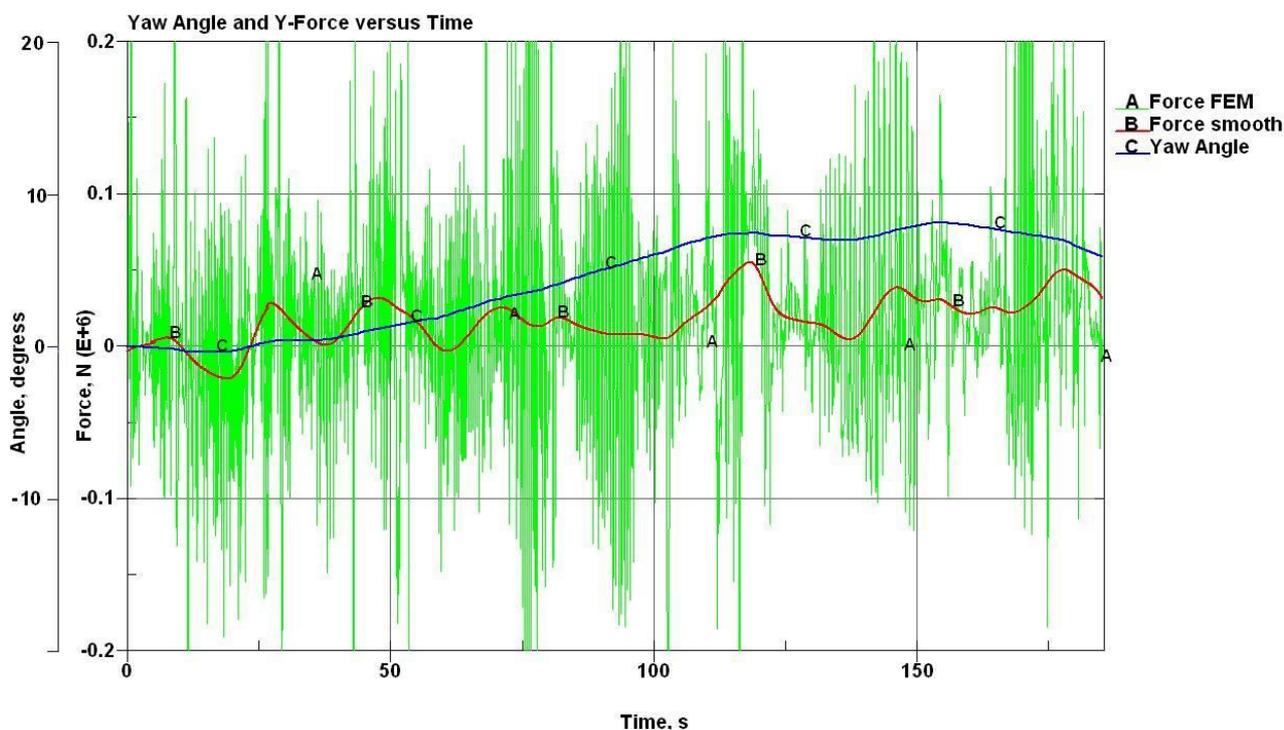
Неучёт поперечного смещения, по сути, сводит реальный процесс рыскания к вращению судна относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести. Но это далеко не всегда соответствует действительности. На рис. 2 приведён пример поведения кривых смещения носовой и кормовой оконечностей модельного судна в варианте расчёта, соответствующем плаванию в «регулярных» сплочённых льдах протяженностью 5,0 м и толщиной 0,5 м.



**Рис. 2.** Сравнение величины поперечного смещения носа и кормы судна при движении в мелкобитых льдах

Анализ зависимостей показывает, что поперечный сдвиг кормы (кривая А, рис. 2) многократно превосходит аналогичный параметр для носа судна (кривая В, рис. 2). Учитывая, что центр тяжести находится примерно в середине судна (его отстояние от миделя составляет 0,6 м), можно утверждать о наличии существенного смещения центра вращения в сторону носа. Эта картина вполне реальна – часто судно «зарывается» форштевнем в лёд, который препятствует перемещениям носа. При этом корма находится в зоне относительного разрежения (при отсутствии интенсивного сжатия) под непосредственным влиянием движительно-рулевого комплекса.

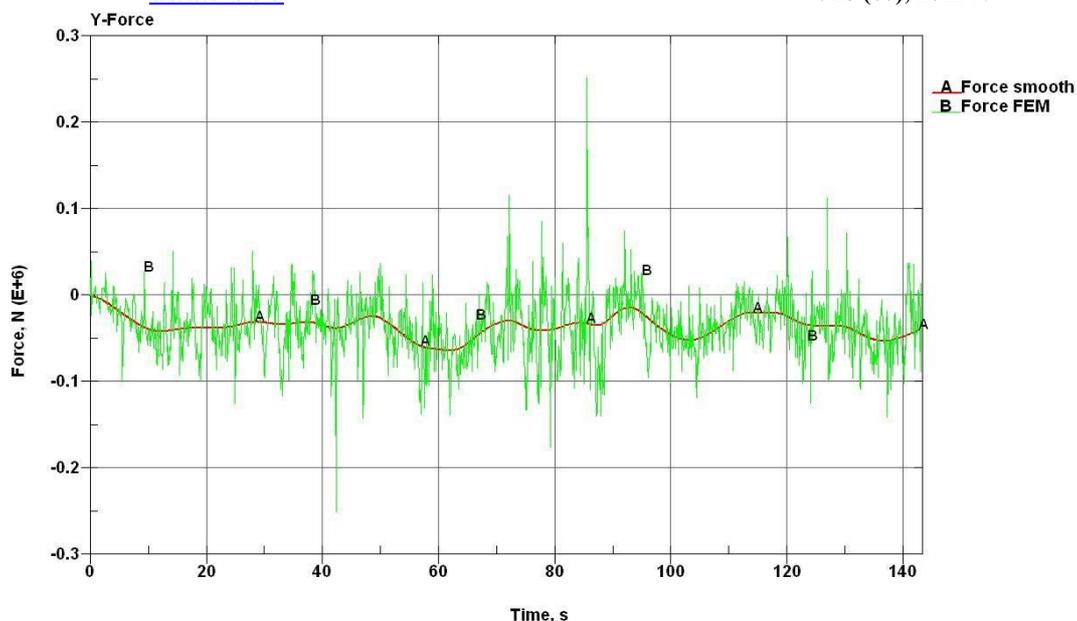
Случайность (сильная пространственная изменчивость даже для однородных условий) уровня ледовых усилий не вызывает сомнений. Это убедительно подтверждают данные, опубликованные в статье [2]. Однако в частных задачах безопасности процесс воздействия на судно поперечных нагрузок (а именно они провоцируют его рыскание) далеко не всегда допустимо сводить к нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием. Данные рис. 3 показывают это на примере «неэффективно» управляемого судна в поле «нерегулярного» сильносплочённого мелкобитого льда толщиной 0,5 м.



**Рис. 3.** Временная зависимость поперечной ледовой нагрузки и угла рыскания для «неэффективно» управляемого судна

Линия В (сглаженное значение, рис.3), описывающая поведение поперечных ледовых нагрузок, почти весь расчётный период имеет положительные значения. Такое регулирование судном и воздействие льда порождает устойчиво однонаправленный угол зарыскивания, величина которого достигает почти 9 градусов (кривая С, рис. 3).

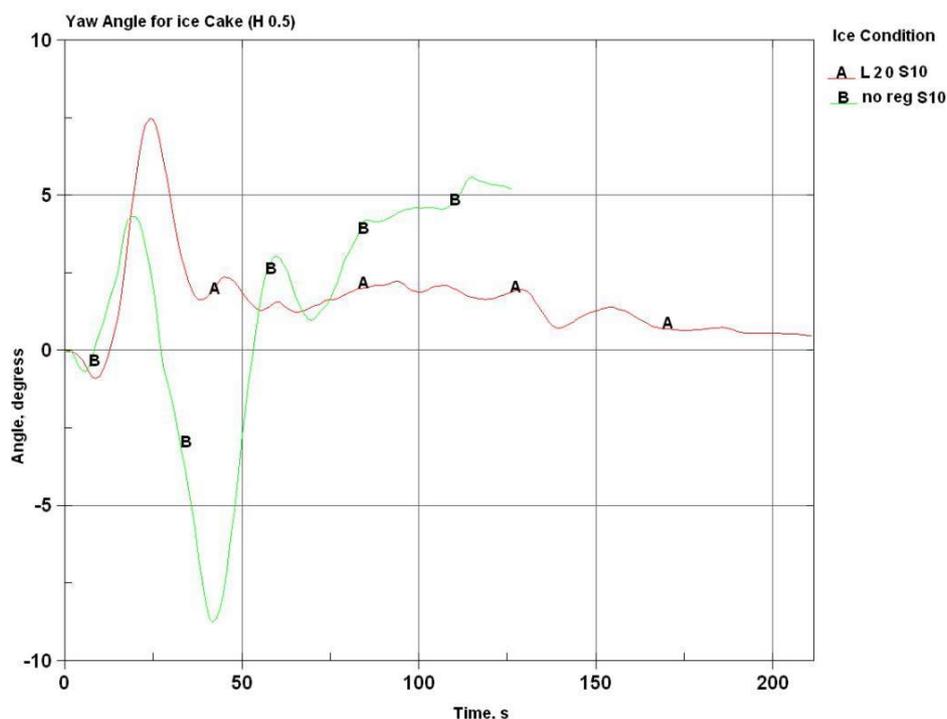
Конечноэлементное моделирование в рамках настоящей статьи выявило значимое влияние граничных условий на поперечные ледовые нагрузки. В качестве подтверждения этого можно указать на данные рис. 4.



**Рис. 4.** Временная зависимость поперечной ледовой нагрузки для «идеально» прямолинейного движения судна

Кривая А (сглаженное значение, рис. 4) описывает поведение суммарной поперечной ледовой силы на корпусе судна, идущего «идеально» прямолинейно в ледовом канале, заполненном «регулярными» мелкобитыми льдами. Даже явно не выраженная асимметрия этих условий (разница в положении кромок канала) уверенно сдвигает уровень ледовых нагрузок в сторону от «нулевого» математического ожидания.

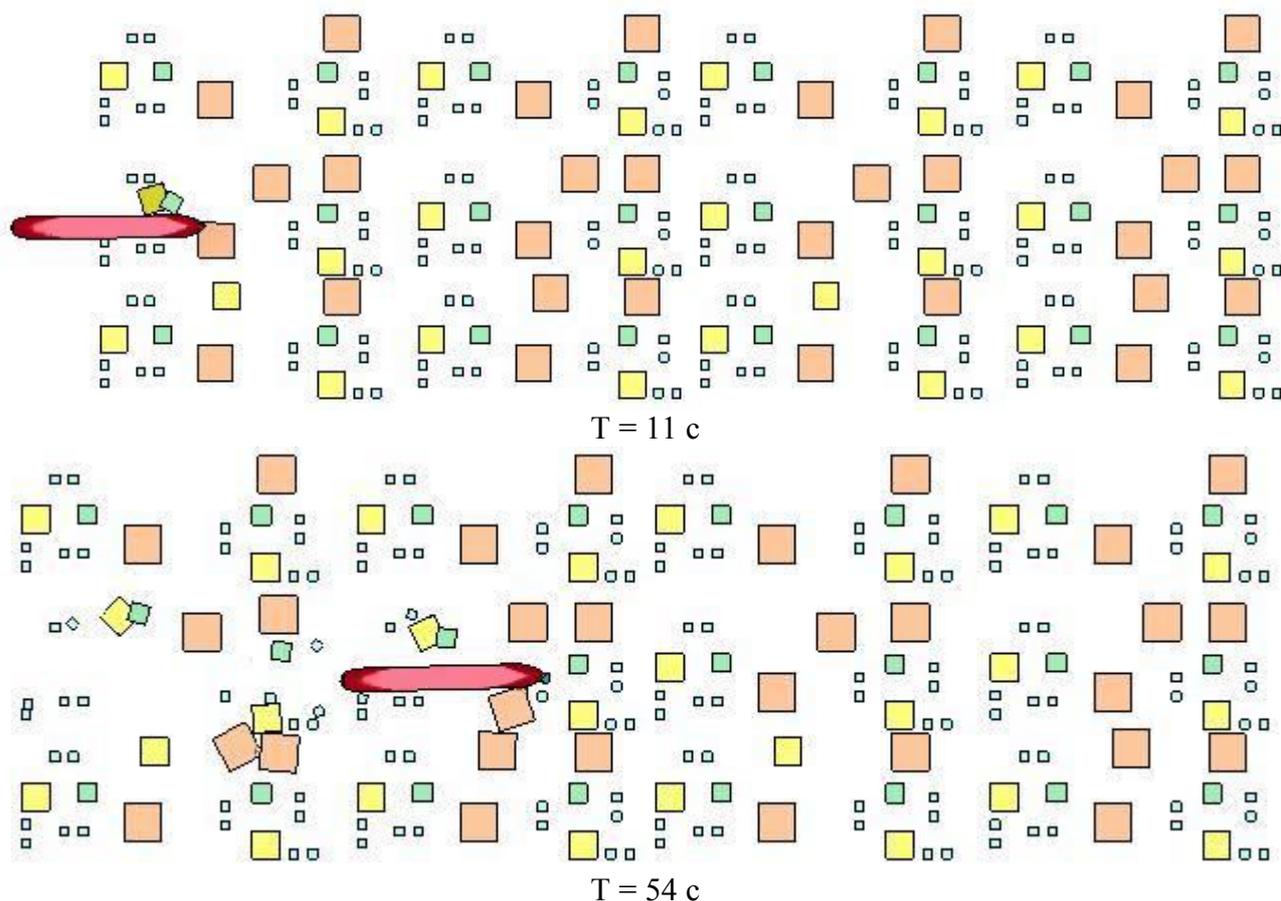
Теоретически непредсказуемо судно может отреагировать на изменение ледовой обстановки, провоцируемое своим движением (например, в канале), в начальной стадии форсирования сильносплочённых перемычек льда, заторошенных участков. На рис. 5 показан фрагмент поведения угла рыскания судна во время преодоления поля «регулярного» мелкобитого льда при протяжённости льдин 20,0 м, толщиной 0,5 м и сплочённостью 9-10 баллов.

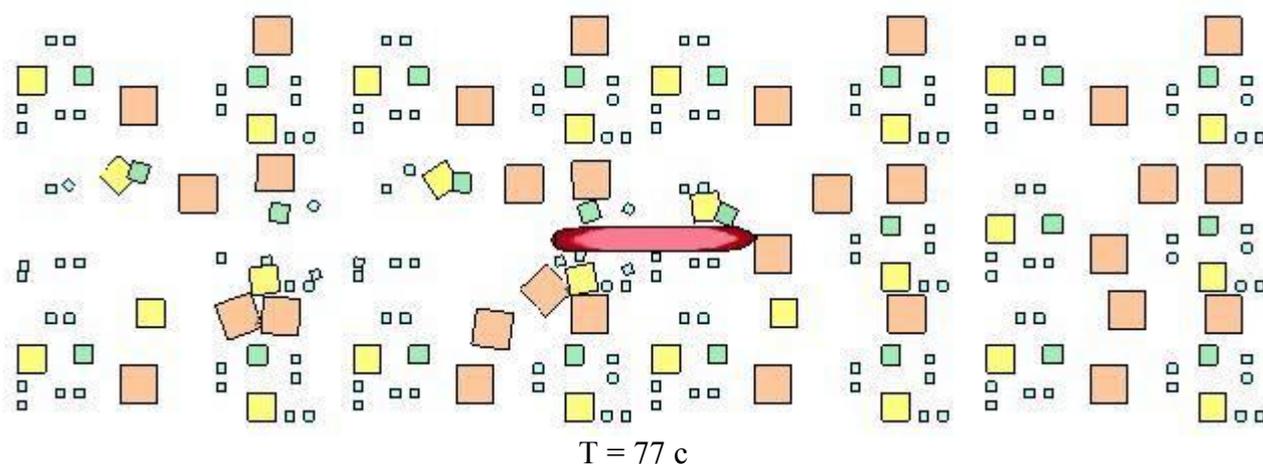


**Рис. 5.** Зависимость угла рыскания судна при движении в сильносплочённых мелкобитых льдах

На кривой А (рис. 5) в районе 26 с очевиден максимум, говорящий о том, что начальный этап входа в лёд сопровождался ощутимым «заносом» кормы. Линия В (рис. 5) описывает поведение судна во время прохождения перемычки «нерегулярного» мелкобитого льда той же толщины и сплочённости, но при значительном смещении судна с оси канала. Как видно, моделирование прогнозирует ещё более неустойчивый характер движения судна. При этом необходимо отметить, что оба расчётных варианта справедливы для жёсткого закона управления, обеспечивающего практическую прямолинейность для условий чистой воды.

Из более поздних трудов следует упомянуть работу [5]. В ней предложены полуэмпирические методики расчёта ледовой устойчивости судна на курсе. В аспекте, интересующем автора настоящей статьи, рассмотрен случай плавания в редких льдах сплочённостью до 3 баллов. При этом процесс взаимодействия *неуправляемого* судна со льдом сведён к случаю соударения с отдельными ледяными образованиями. Однако практика плавания показывает, что уже при сплочённости 1,5 – 2,0 балла корпус начинает контактировать с несколькими льдинами одновременно. Мало того, не следует исключать и взаимодействия льдин. Это можно проследить как на характере движения модельного судна (рис. 6), так и на осциллограмме ледовых нагрузок (рис. 7).





$T = 77 \text{ c}$

Рис. 6. Качественная картина движения судна в сильноразреженных мелкобитых льдах

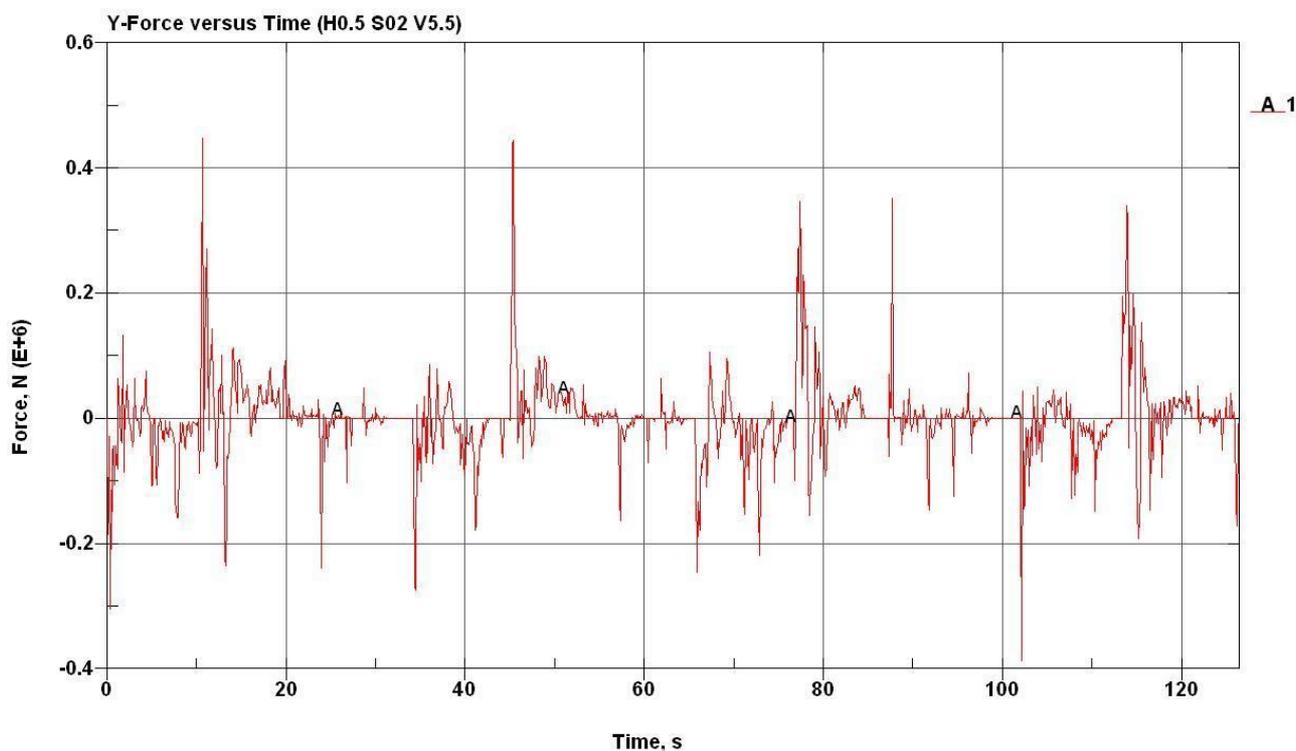


Рис. 7. Временная зависимость поперечных корпусных ледовых нагрузок при движении судна в сильноразреженных мелкобитых льдах

Поэтому ряд факторов в зависимостях [5] будет либо описан неточно, либо вовсе не определён (скорости соударения, приведённые массы, координаты места контакта). Также необходимо отметить, что модель контакта судна со льдом базируется на положениях работы [4]. Корректность последней в отношении ряда основных характеристик соударения судна и льдины сомнительна (по крайней мере, для ледовых условий внутренних судоходных водоёмов) [3]. Кроме того, с позиций обеспечения безопасности судоходства решение задач управляемости в разреженных льдах должно быть согласовано с обоснованным выбором допустимых скоростей движения.

Ниже предложены характерные результаты конечноэлементного моделирования маршрутной устойчивости судна в мелкобитых льдах различных характеристик. Анализировалось влияние основных параметров льдов: толщины, раздробленности и сплочённости при движении в ровном канале шириной около 170 м.

Оценка маршрутной устойчивости подразумевает задание закона регулирования [6], так как он определяет ответную реакцию судна на воздействие льдов. Анализ эффективности

алгоритмов управления судном во льдах требует отдельного исследования. Последнее утверждение можно проиллюстрировать графиками рис. 8.

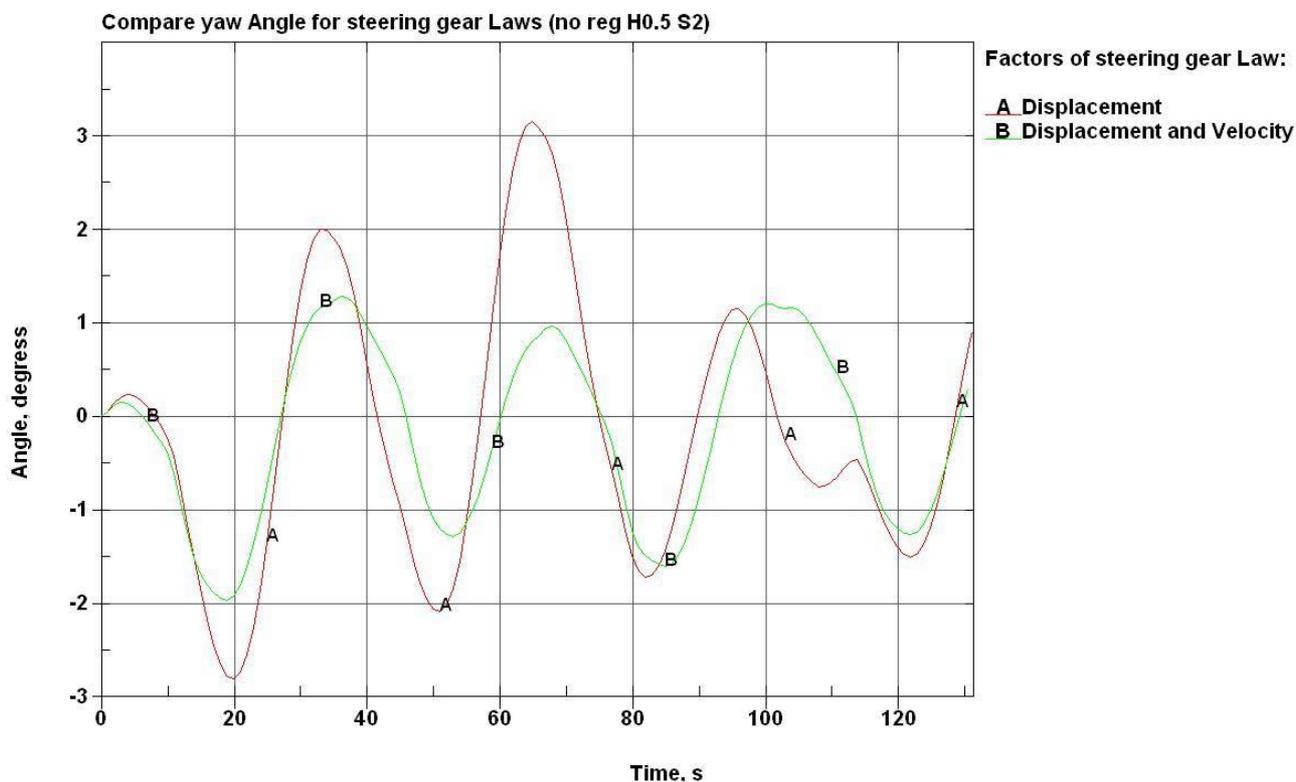


Рис. 8. Сравнение угла рыскания для различных режимов управления судном во льдах

Кривые, показанные на рис. 8, описывают временную зависимость угла рыскания судна при его движении в «нерегулярных» мелкобитых льдах толщиной 0,5 м и сплочённостью 2 балла. Их анализ показывает, что введение дополнительного фактора в закон управления судном улучшает его маршрутную устойчивость. При этом угол рыскания уменьшается в 1,5 – 3,0 раза (кривая В) по сравнению с вариантом, где использовалась однофакторная функция регулирования, учитывающая только поперечное смещение носового перпендикуляра (кривая А). При этом в качестве дополнительного фактора использовалась *скорость* поперечного смещения носового перпендикуляра.

Тем не менее, в последующих примерах моделирования была использована однофакторная функция регулирования, аргументом в которой является поперечное смещение носового перпендикуляра судна. В своём выборе автор исходил из того, что в ледовых условиях недопустимо (либо крайне ограничено) автоматическое управление судном. Визуальная (инструментальная) проводка по линии маршрута (створу), в первую очередь, базируется на оценке смещения судна. Автор понимает субъективность подобного выбора, но всякое непосредственное управление судном представляет собой субъективный процесс. Кроме того, немаловажным оправданием такого решения является достаточный опыт автора в численных решениях подобных задач.

Результаты численных оценок угла рыскания и поперечного смещения судна показаны на рис. 9 – 12.

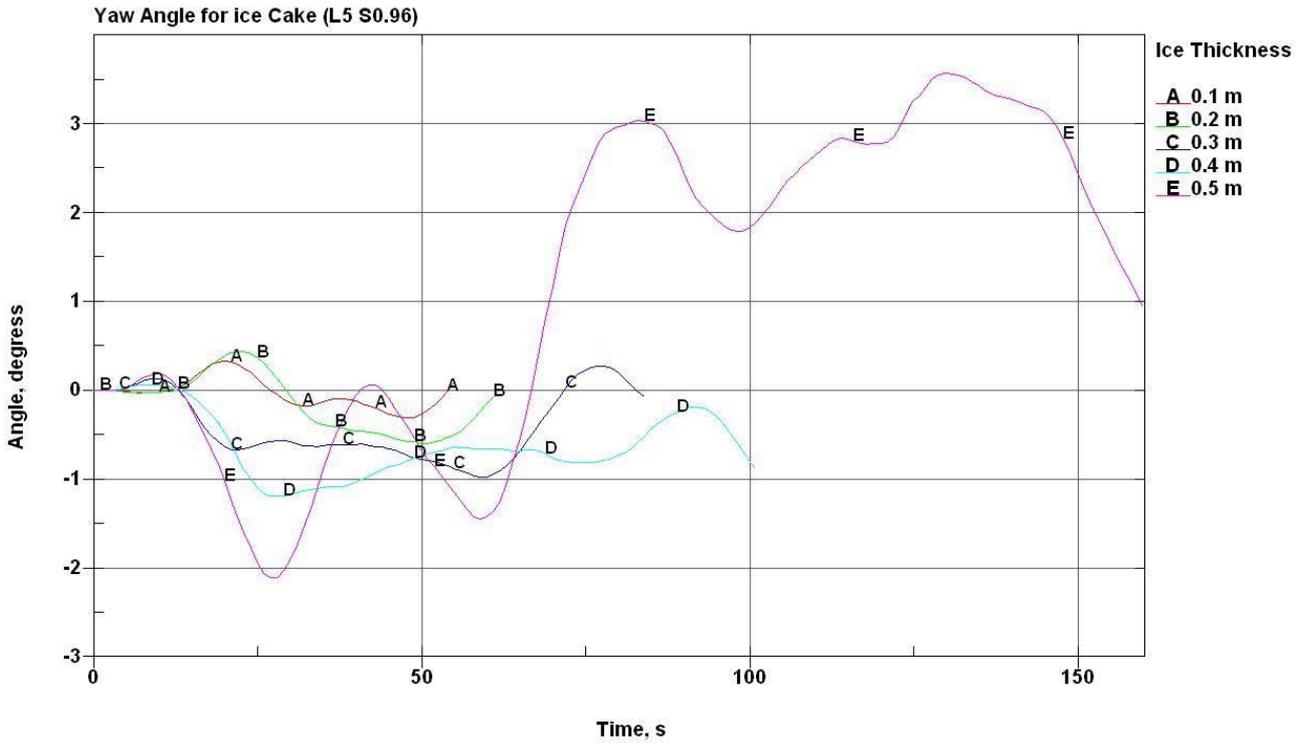


Рис. 9. Влияние толщины мелкобитых сильносплочённых льдов на величину угла рыскания судна

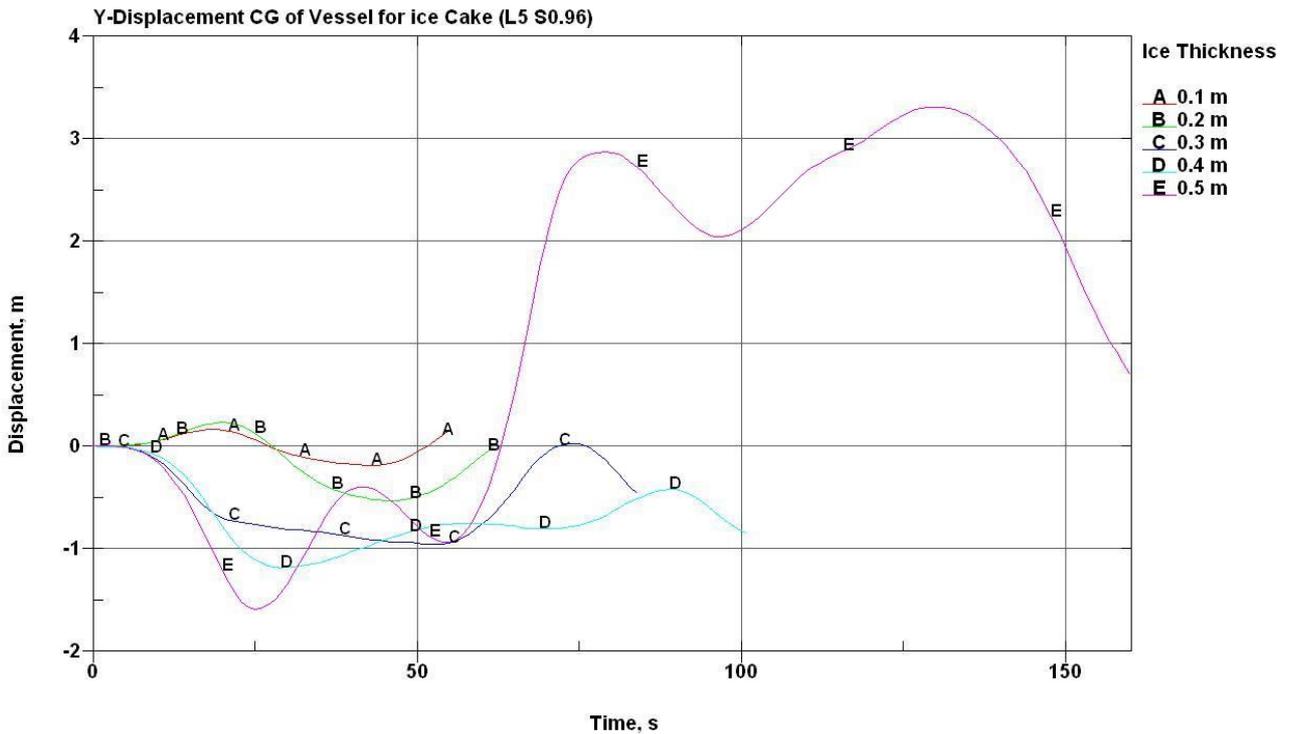


Рис. 10. Влияние толщины мелкобитых сильносплочённых льдов на величину поперечного смещения судна

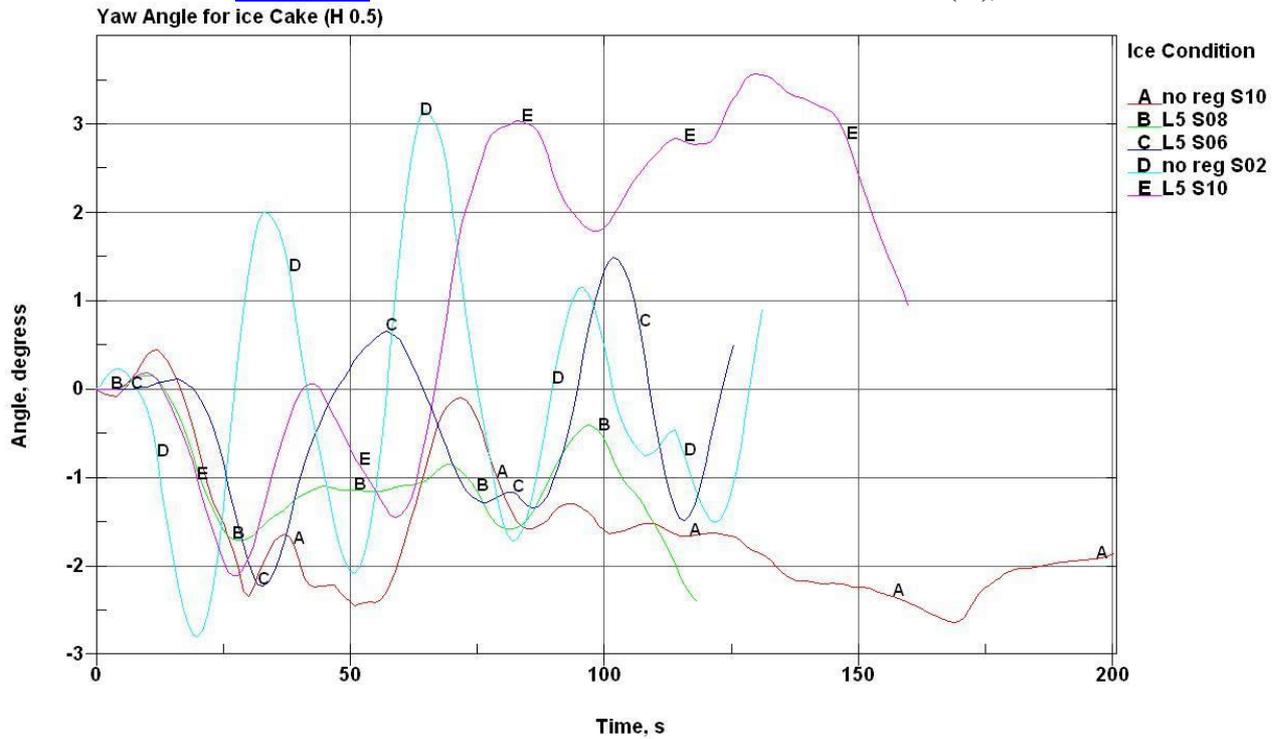


Рис. 11. Влияние сплочённости мелкобитых льдов на величину угла рыскания судна

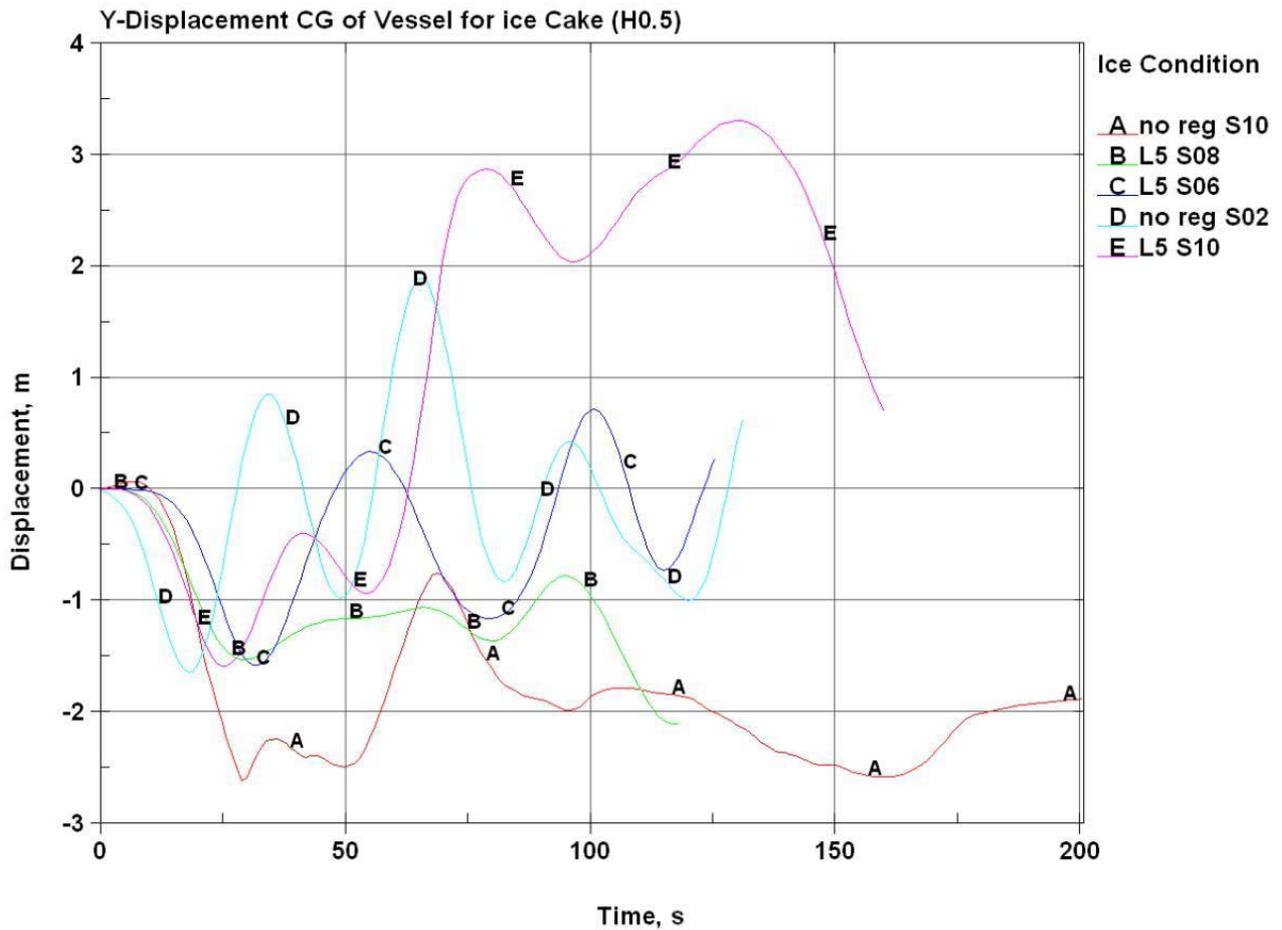
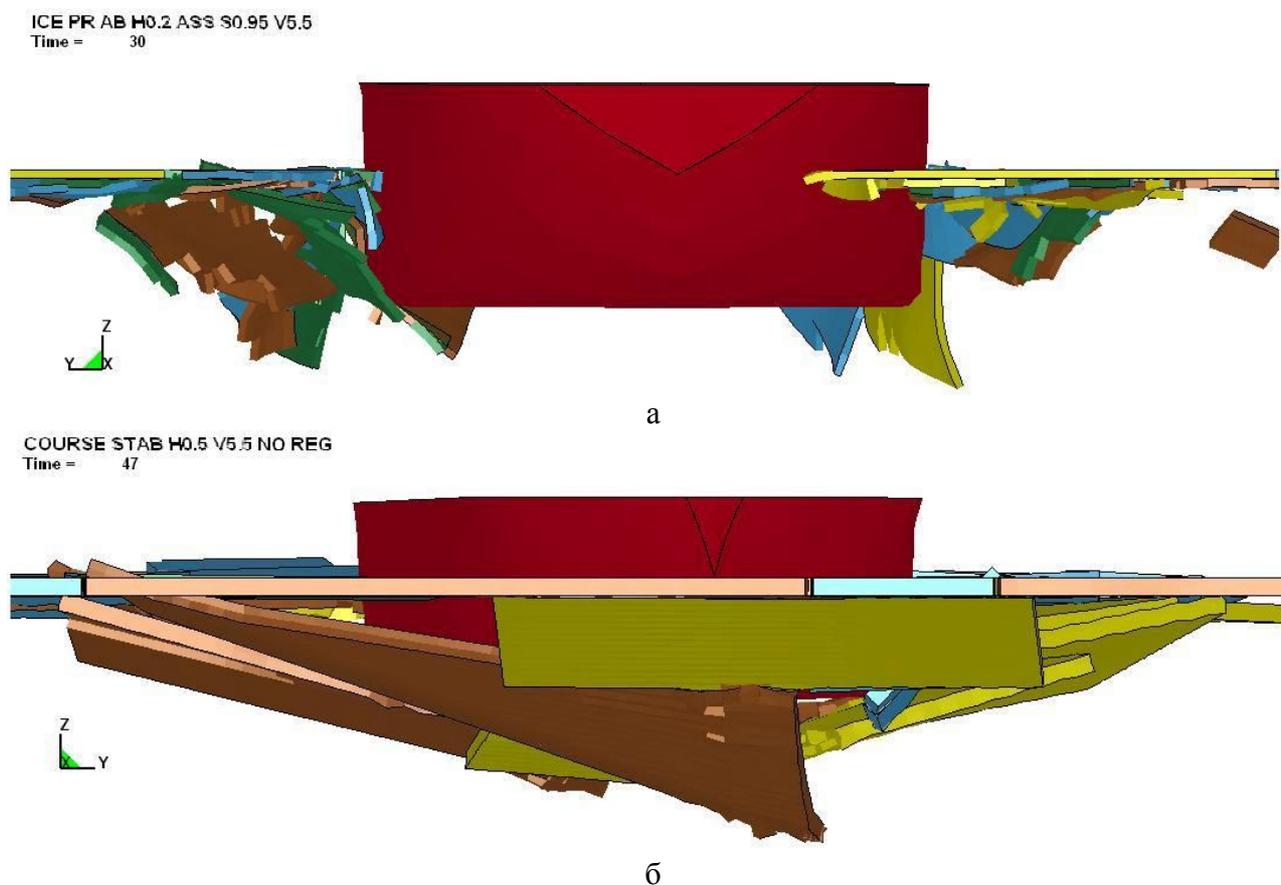


Рис. 12. Влияние сплочённости мелкобитых льдов на величину поперечного смещения судна

С ростом толщины сильносплочённых (9-10 баллов) льдов протяжённостью около 5,0 м увеличивается смещение и амплитуда угла рыскания (рис. 9, 10). Тем не менее, для

заданного закона управления её вряд ли можно признать значимой. Даже для льдов толщиной 0,5 м она не превысила 3,5 градусов (кривая Е, рис. 9).

Повышение параметров рыскливости судна с увеличением толщины сплочённых льдов можно объяснить следующим. Тонкий лёд при достаточно большой скорости движения интенсивно разрушается, измельчается и расталкивается носовой частью корпуса судна под кромки ближних льдин, не вызывая ощутимых различий в поперечных нагрузках с разных бортов (рис. 13а). При движении в толстых льдах их дробление наблюдается в гораздо меньшей степени. Преобладают нагрузки от деформирования, притапливания и раздвигания льдин, способствующие случайному «соскальзыванию» форштевня в ту или иную сторону (рис. 13б). Учитывая низкую достижимую скорость, судно гораздо медленнее «восстанавливается», что многократно увеличивает угол, период рыскания и боковое смещение.



**Рис.13.** Характер взаимодействия корпуса судна с мелкобитыми льдами различной толщины  
а – толщина льда 0,2 м (вид с кормы); б – толщина льда 0,5 м (вид с носа)

Иные состояния раздробленности не вносят качественных изменений в характер движения судна для различных толщин льда. Количественная картина описывается кривыми, незначительно отличающимися от данных рис. 9 и 10.

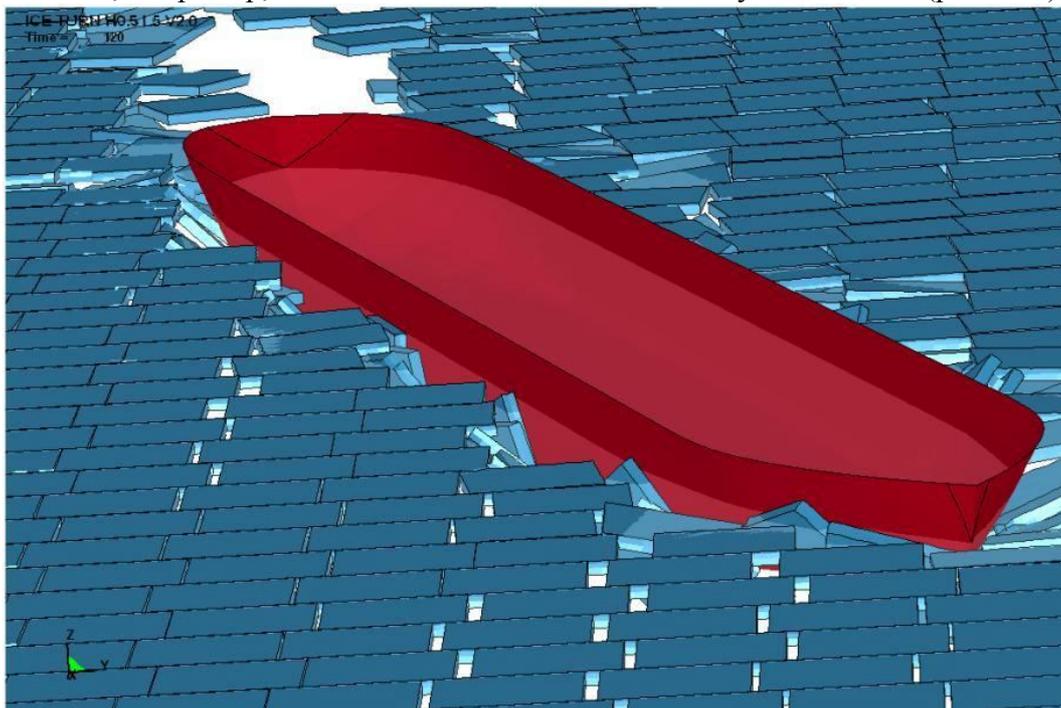
Влияние сплочённости мелкобитых льдов на маршрутную устойчивость судна не является однозначным. На данном этапе моделирования можно сделать вывод пока только об устойчивом падении периода рыскания с уменьшением сплочённости (рис. 11, 12).

**3. Поворотливость.** Поворотливость характеризует способность регулируемого судна перемещаться по заданной криволинейной траектории. В теории управляемости она нормируется параметрами установившейся циркуляции. Однако в реальных условиях полная циркуляция во льдах, как правило, не практикуется. Это обусловлено значительным увеличением её диаметра по сравнению с чистой водой и ограниченной шириной ледового

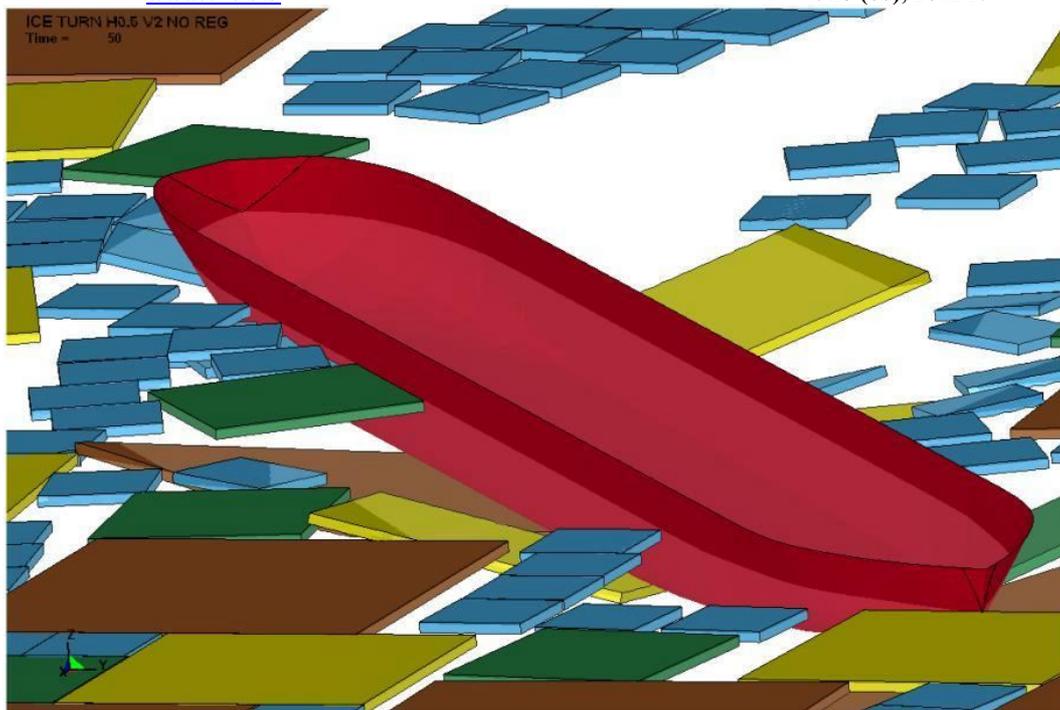
канала (на внутренних водных путях – возможно и габаритами судового хода). В целях обеспечения безопасности часто реализуются такие приёмы, как разворот способом «звёздочка», выполнение «отворота» или «уклонения». Но все перечисленные маневры реализуют в себе хотя бы один элемент циркуляции.

Необходимо отметить, что эти маневры относятся к «эволюционному» периоду циркуляции, для которого свойственна неустойчивость параметров движения даже в чистой воде и потому приближённость оценок. Влияние битых льдов на характеристики поворотливости для этого периода вовсе не изучалось. К настоящему времени существует, пожалуй, единственная работа, где предложена аналитическая методика оценки ледовых сил и моментов на корпусе судна, движущемся криволинейно в мелкобитых льдах [7]. Хотя в своё время названный труд претендовал на звание теоретических основ управляемости судна во льдах, более позднее использование автором настоящей статьи САЕ-систем для моделирования ледовых взаимодействий подвигло его к существенному критическому осмыслению данной работы. Накопленный к настоящему времени опыт, по сути, сводит работу [7] до уровня чисто эмпирической – ограниченной рамками того материала, на базе которого получен расчётный метод.

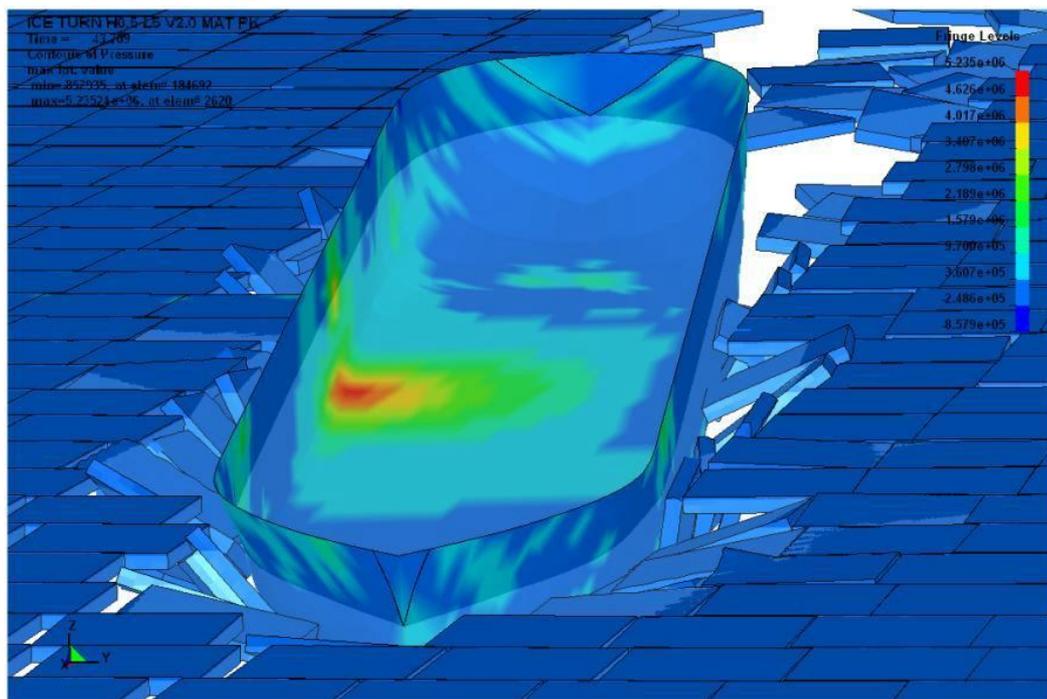
Основные недостатки интегральных подходов в оценках ледового сопротивления судна рассмотрены при анализе ходкости в мелкобитых льдах [2]. Они полностью распространяемы и на случай криволинейного движения. Особо следует подчеркнуть неприемлемость гипотезы о *сплошности контакта*. Интегральная модель, предложенная в работе [7], сводит действительное взаимодействие корпуса с битым льдом к сплошной нагрузке, разнесённой вдоль действующей ватерлинии судна. При этом автор проводит аналогию между воздействием льда на судно и газодинамикой, согласно которой непрерывное давление газа на стенки сосуда является следствием ударов отдельных молекул. Однако подобное сравнение здесь абсолютно неуместно, ибо несопоставимы соотношения размеров контактирующих тел. Такую аналогию можно проводить лишь при условии измельчения льда до величины кристаллов (зёрен), его образующих. Фактически льдины контактируют с обшивкой в нескольких локальных зонах, чаще находящихся вне уровня рабочей ватерлинии. Причём это справедливо как для разреженных, так и для сплочённых льдов. Это наглядно показано на качественной картине движении судна в мелкобитых льдах различной раздробленности (рис. 14а, 14б) и количественно подтверждается, например, полем давлений на взаимодействующих телах (рис. 14в).



а



б



в

**Рис. 14.** Характер контакта сплочённых мелкобитых льдов с корпусом судна при его криволинейном движении

Следует признать, что имеет место перераспределение ледовых нагрузок по корпусу. Это можно показать данными рис. 15, на котором приведён пример одномоментных кривых относительного напряжения по периметру нескольких ватерлиний (А – рабочая; В – уровень 1 м ниже рабочей; С – уровень 2 м ниже рабочей; D – уровень 3 м ниже рабочей).

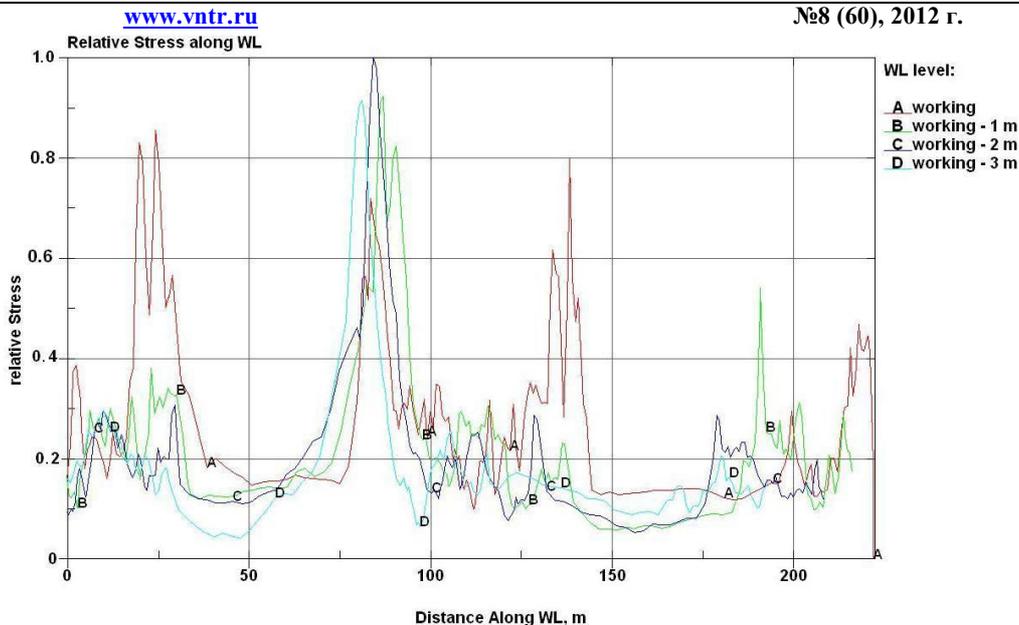


Рис. 15. Распределение относительных ледовых напряжений в корпусе по периметру ватерлиний

Но характер этого перераспределения в границах ледового пояса судна (рис. 15) несопоставим с его оценками в работе [7]. Поэтому интегральная модель нагрузок с оговорками может быть допустима при оценке результирующих ледовых сил, но вряд ли приемлема для предсказания их моментов. Куда более реалистичной и привлекательной является дифференциальная модель взаимодействия судна и льда, описанная в работе [5]. Однако для нахождения контактных зон она требует описания геометрии сегментной ломки льда и апробирована пока только на сплошных льдах. При этом следует отметить очевидные противоречия с методикой [7] в схематизации процесса взлома льда корпусом судна.

Неучёт граничных условий и раздробленности льда являются также принципиальными изъянами работы [7]. Последнее можно пояснить результатами моделирования нескольких вариантов маневра «отворот» в сильносплочённых льдах толщиной 0,5 м. На рис. 16 это показано траекториями движения кормы судна.

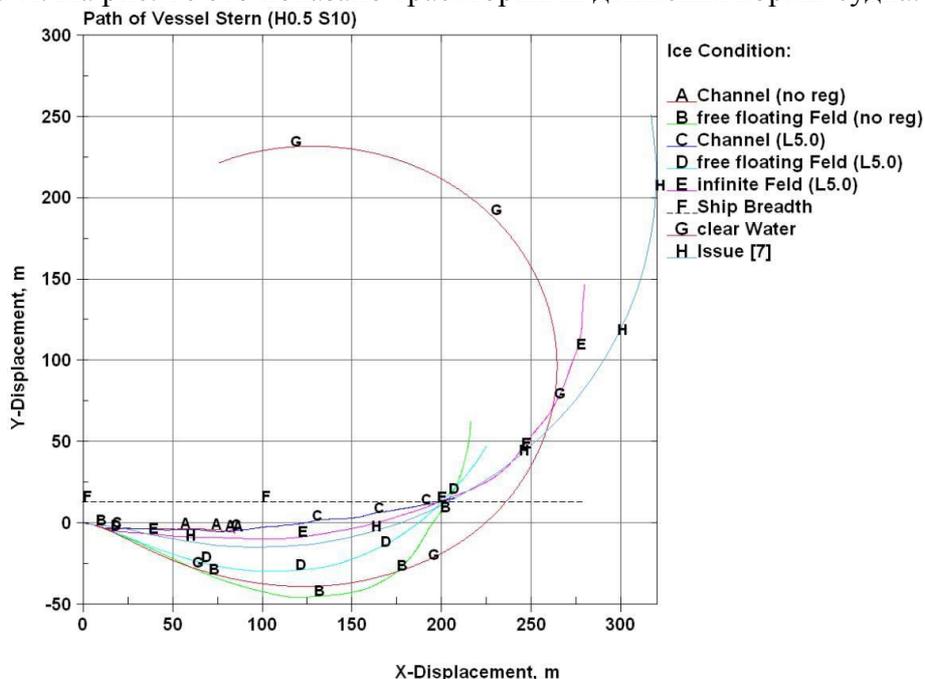


Рис. 16. Траектория движения кормы судна при отвороте

Упомянутый маневр заключается в монотонном изменении курса судна при обычно переложенных на борт рулевых органах. Его завершением принято считать момент ухода

кормы в сторону поворота от линии первоначального курса на расстояние, равное ширине судна. Из анализа кривых рис. 16 очевидно, что маневр судна индивидуален в каждом варианте условий. Так, наиболее круто судно разворачивается в свободно дрейфующих ледяных полях ограниченных размеров (линии В, D; в расчётах использовалось поле мелкобитого льда с поперечным размером около 400 м). Тем не менее, наблюдается влияние степени раздробленности льда – в «нерегулярных» льдах маневр происходит с большим «раскатом» кормы (линия В). В бесконечном поле «регулярных» льдов судно поворачивает явно плавнее (вариант Е). В первом приближении для этого варианта можно спрогнозировать диаметр циркуляции – в пределах 370 м. Пологую траекторию с небольшим углом дрейфа судна даже по корме (около 13 градусов) следует ожидать при движении в стеснённых условиях канала шириной 200 м, заполненного «регулярными» льдами протяжённостью 5,0 м (вариант С). В канале с «нерегулярными» льдами конечноэлементное моделирование предсказывает «заклинивание» судна по прошествии пути в 0,75 своей длины (кривая А).

Численные эксперименты прогнозируют примерно одинаковую потребную длину акватории для выполнения маневра во всех расчётных случаях (кроме варианта А) – немногим более 200 м (на рис. 16 она находится как абсцисса точек пересечения кривых В, С, D, Е с прямой F). Но по времени, затраченному на отворот очевиден значительный разброс результатов – от примерно 1,5 минут в варианте D до 3,0 минут в варианте С (рис. 17).

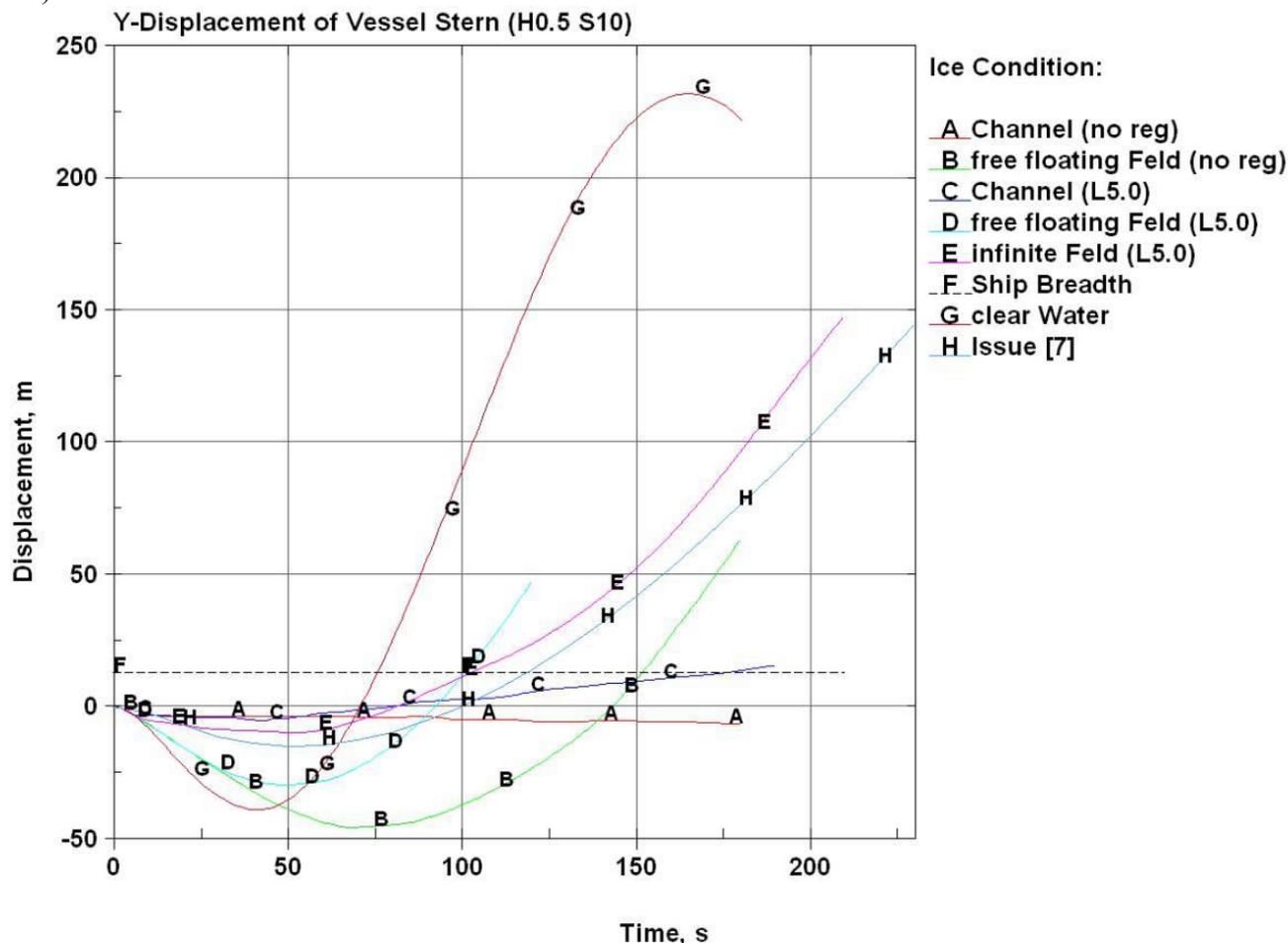


Рис. 17. Временная зависимость поперечного смещение кормы судна при отвороте

Неустойчива и скорость движения судна в процессе маневра (рис. 18). Относительно небольшие её колебания (в пределах 10% от начальной) отмечены только в варианте D. В варианте В льды сначала почти вдвое уменьшают первоначальный ход судна, после чего по мере интенсивного раздвигания поля скорость начинает восстанавливаться. Наблюдается

тенденция падения скорости в варианте Е. Но снижение это немонотонно с предполагаемой стабилизацией в пределах 1,5 м/с. Относительно устойчивое уменьшение скорости демонстрируют варианты А и С. Вариант С прогнозирует стабилизацию хода на уровне 0,6 м/с, вариант А – практическую остановку судна через 2,5 мин.

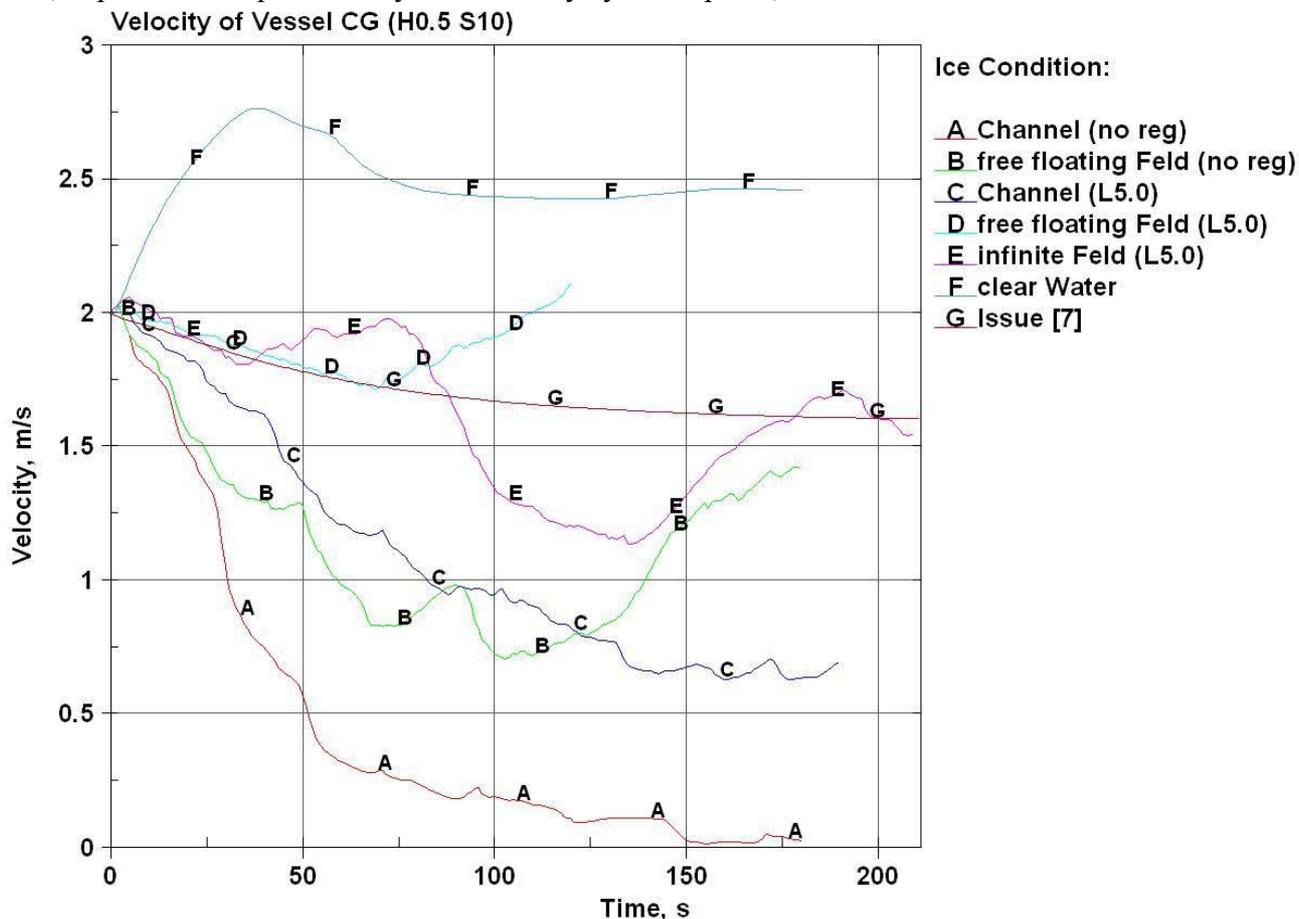


Рис. 18. Временная зависимость линейной скорости центра тяжести судна

В ряду графиков, показанных на рис. 16, 17 имеются кривые Н. Они рассчитаны для мелкобитых льдов по методике [7]. Можно отметить некоторую сходимость аналитических расчётов с вариантом Е применительно к описанию отворота, после чего начинают накапливаться расхождения результатов. Линии G (рис. 16, 17) и F (рис. 18), приведённые для сравнения, являются итогом численного моделирования маневра судна в условиях чистой воды.

#### 4. Выводы

1. В настоящее время отсутствуют адекватные аналитические методы расчёта управляемости судна в мелкобитых льдах.
2. Решение проблем, связанных с анализом условий безопасного маневрирования во льдах, требует учёта большого количества пространственно-временных факторов, реализация чего на данном этапе аналитически невозможна.
3. При отсутствии достоверных натуральных данных по ледовой управляемости в качестве источника статистической информации и средства адекватного решения задач безопасности допустим численный эксперимент (например, в конечноэлементной постановке).

## Литература

1. Ионов Б.П. Курсовая устойчивость судов во льдах. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2010. № 3 (82). - т. 78. с. 167-173.
2. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Ходкость. Вестник научно-технического развития, №1, 2012. Электронный журнал, № гос. рег. 0421200120, ISSN 2070-6847, <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=571>
3. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Прочность. Вестник научно-технического развития, №12, 2011. Электронный журнал, № гос. рег. 0421200120, ISSN 2070-6847, <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=563>
4. Прочность судов, плавающих во льдах / Ю.Н.Попов, О.В.Фаддеев, Д.Е.Хейсин, А.Я.Яковлев. – Л.: Судостроение, 1967. – 224 с.
5. Сазонов Кирилл Евгеньевич. Управляемость судов во льдах: методы определения ледовых сил, действующих на движущийся по криволинейной траектории корпус, и зависимости показателей поворотливости судов от характеристик корпуса и внешних условий : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук : Специальность 05.08.01 – теория корабля и строительная механика / Гос. науч. центр РФ.- Санкт-Петербург, 2004.- 285 с.: ил. РГБ ОД, 71 07-5/554
6. Технические средства судовождения: Учебник для ВУЗов / В.И. Дмитриев, Ф.В. Евменов, О.Г. Каратаев, В.Д. Ракитин; под ред. О.Г.Каратаева. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
7. Тронин В.А. Повышение безопасности и эффективности ледового плавания судов на внутренних водных путях: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: специальность 05.22.16 – Судовождение / Горький, 1990. – 414 с.
8. Хейсин Д.Е. Использование вероятностных методов при оценке маневренных качеств судов во льдах // Труды ААНИИ. – Л. 1979. т. 309. с. 35-50.

*Поступила: 17.05.12.*