

Визуализация САЕ-решений частных задач ледового судоходства. Совместное маневрирование судов

В.А. Лобанов¹, Ю.Р. Гуро-Фролова²

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО ВГУВТ)

¹ ORCID: 0000-0002-0931-7317, lobbas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-6048-8576, business_box_2@mail.ru

Аннотация

В работе отмечено, что обеспечение эффективности и безопасности ледовых транспортных операций на водном транспорте отличает широкий спектр необходимых действий, маневров, режимов и динамических приёмов работы судов. Это сохраняет актуальной проблему оценки их ледовых качеств в особых условиях эксплуатации.

С применением САЕ-технологий рассмотрен круг актуальных задач движения и совместного маневрирования судов в различных ледовых и навигационных условиях: прогноз скорости прокладки и качественного состояния ледового канала в толстых и предельных сплошных льдах при различных тактических приёмах работы нескольких ледоколов; эффективность и безопасность околки ледокольными средствами малоподвижного транспортного судна в сплошных льдах.

По анализу результатов многовариантного САЕ-моделирования даны конкретные рекомендации для исследованного ледокольного и грузового флота различных ледовых категорий по выбору безопасных дистанций маневрирования, законов регулирования судов, выполнения стандартных операций.

Ключевые слова: ледовые условия, ледовый канал, ледокол, судно ледового класса, САЕ-система, конечноэлементное моделирование.

1. Введение

Данной работой автор продолжает серию публикаций, посвящённых использованию средств визуализации современных САЕ-систем при оценках ледовых качеств судов в особых условиях эксплуатации [1,2].

САЕ-система (Computer Aided Engineering) – это компьютерная технология, моделирующая и визуализирующая пространственно-временное развитие исследуемого процесса. Основой САЕ-системы является численный решатель систем дифференциальных уравнений, описывающих поведение предварительно дискретизированной области пространства (среды, тела). Кроме отработанных численных методов сходимость решения здесь также обеспечивается специальными «искусственными» программными процедурами, алгоритмами и приёмами.

Принципиально значимым этапом САЕ-технологий является постпроцессинг, реализующий обработку результатов моделирования средствами научной визуализации. Инструментарий постпроцессора – это трёхмерная графика с богатым набором опций для анализа модели (масштабирование, детализация, инструменты для измерений, градиентные поля параметров, уровни, изолинии, следы, сечения, разрезы, векторы, транспарентность и др.), анимация, а также графический процессор, формирующий различные узловые и элементные пространственно-временные функции при возможности их математического анализа.

Весь комплекс задач морской и речной ледотехники относится к обширному классу проблем механики деформируемых сред. Научная новизна САЕ-технологий при рассмотрении задач механики заключается в моделировании взаимодействия объектов в отличие от моделирования нагрузок, что предлагают традиционные полуэмпирические и аналитические методы. Теоретические основы САЕ-моделирования взаимодействия корпуса судна и его движительно-рулевого комплекса с водоледяной средой в системе LS-DYNA [3] (типы и модели конечных элементов, особенности реакции материалов на нагрузку, алгоритмы поведения контактных границ, приёмы формирования геометрии конструкций и конечноэлементных сеток для них, начальные и граничные условия, способы понижения ресурсоёмкости моделей) разработаны автором в монографии [4].

Научно-техническая деятельность автора связана с оценками ледовых качеств судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания, большая часть которых по ледовым критериям классификационных обществ относится к неарктическим категориям. Безопасность и эффективность ледовой эксплуатации такого флота может быть гарантирована лишь в условиях мелкобитых и тёртых льдов. Формирование такой ледяной среды и безопасность ледового судоходства в настоящее время обеспечивается ледоколами с многовальными движительно-рулевыми комплексами (проекты 1191 и 1105 типа «Капитан Евдокимов» и «Капитан Чечкин» соответственно). Подготовка ледовых каналов для проводки транспортного флота, сопровождение караванов, оказание ледокольной помощи одиночным судам, вспомогательные операции, как правило, связаны с совместным маневрированием во льдах нескольких судов. Аналитические методики количественного прогноза последствий таких маневров не разработаны. Поэтому при отсутствии репрезентативной натурной или эмпирической информации ледовые эксперты вынуждены использовать виртуальное моделирование процессов ледового соманеврирования судов.

2. Прокладка канала

Результативность совместной работы ледоколов признана эффективной в толстых, предельных и особенно в запредельных по ледопроеходимости ледоколов сплошных льдах [5,6]. Разновидности совместной прокладки двумя ледоколами преследуют цели ускоренного создания существенно увеличенного по ширине ледового канала, но в то же время достаточного для безопасной проводки транспортного флота по критерию степени раздробленности полученных битых льдов.

Преобладающая часть отечественного грузового флота внутреннего и смешанного плавания имеет допустимое разрешение классификационных обществ на плавание только в мелкобитых и тёртых льдах толщиной не более 0,5 м. Учитывая это, прокладка ледового канала упомянутым способом связана с вероятным движением ледоколов на малых траверзных дистанциях. Последнее с позиций безопасности совместного маневрирования ледоколов порождает проблему обоснования выбора этих дистанций. При этом необходимо отметить, что даже одиночно работающий ледокол проекта 1191 на прокладке канала в толстых льдах не отличается удовлетворительной маршрутной устойчивостью, параметры которой к тому же очень чувствительны к выбранному закону регулирования судна.

Как продемонстрировали численные эксперименты, прокладка канала в толстых и предельных сплошных льдах параллельной работой ледоколов на траверзных расстояниях свыше 40 – 45 м не даёт желаемого эффекта. При этом нет выигрыша ни в скорости формирования канала, ни в его качественном состоянии (Рис. 1, 2).

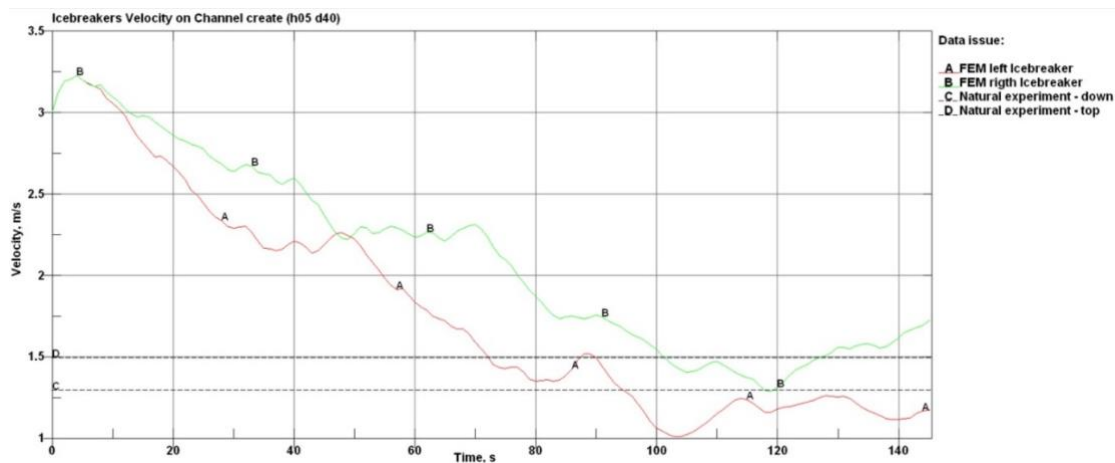


Рис. 1. Ходкость ледоколов проекта 1191 при их параллельной работе на прокладке канала в сплошных льдах толщиной 0,5 м на траверзном расстоянии 40 м

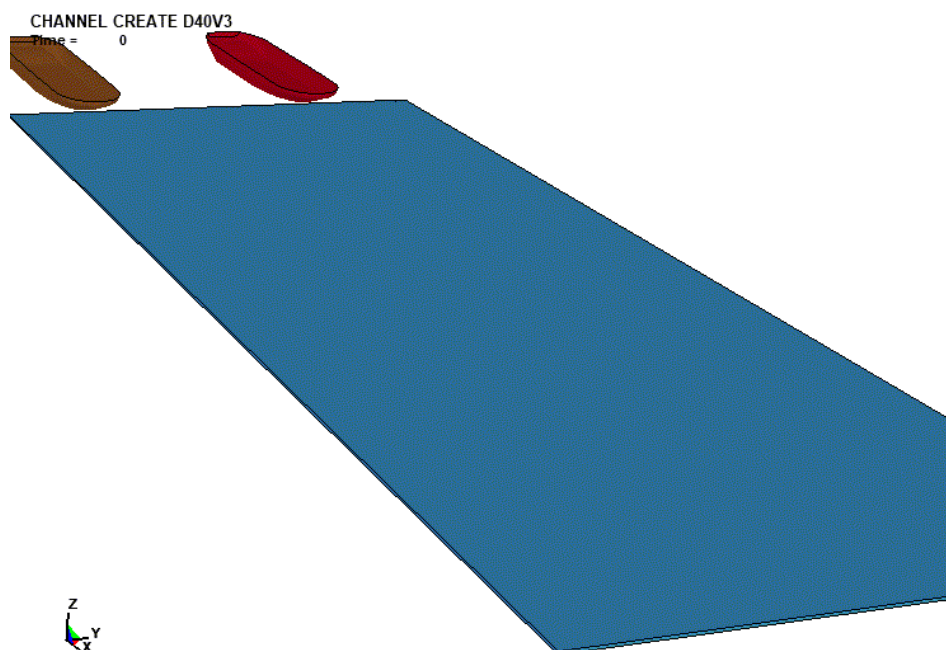


Рис. 2. Качественное состояние канала при параллельной работе двух ледоколов проекта 1191 в сплошных льдах толщиной 0,5 м на траверзном расстоянии 40 м

Так данные рис. 1 показывают, что скорости движения ледоколов к началу периода относительно установившегося движения (линии А и В примерно через 1,5 мин от начала расчёта) близки к ходкости этих судов при автономной работе по данным натуральных испытаний (линии С и D). К тому же полученный ледовый канал по критерию раздробленности льдов непригоден для проводок исследуемого транспортного флота с низким уровнем ледовых категорий. Для обеспечения требуемого измельчения льда до состояния мелкобитого нужен дополнительный проход ледокола (Рис. 2).

Уменьшение траверзного расстояния между ледоколами до 20-25 м с попытками их удержания в пределах маршрутных полос чревато многократными навалами судов, что вряд ли терпимо с позиций их безопасности. На минимальных начальных расстояниях параллельной работы (менее 15-20 м) ледоколы быстро «взаимосваливаются» и далее продолжают своё движение «борт к борту». При этом отмечается приемлемое качественное состояние получаемого канала по ширине и раздробленности льдов для проводок транспортных судов (Рис. 3). А скорость его прокладки (линии А и В, рис. 4)

возрастает более чем в 1,5 раза против автономной работы одиночного ледокола (горизонтальные пунктиры С и D, рис. 4).

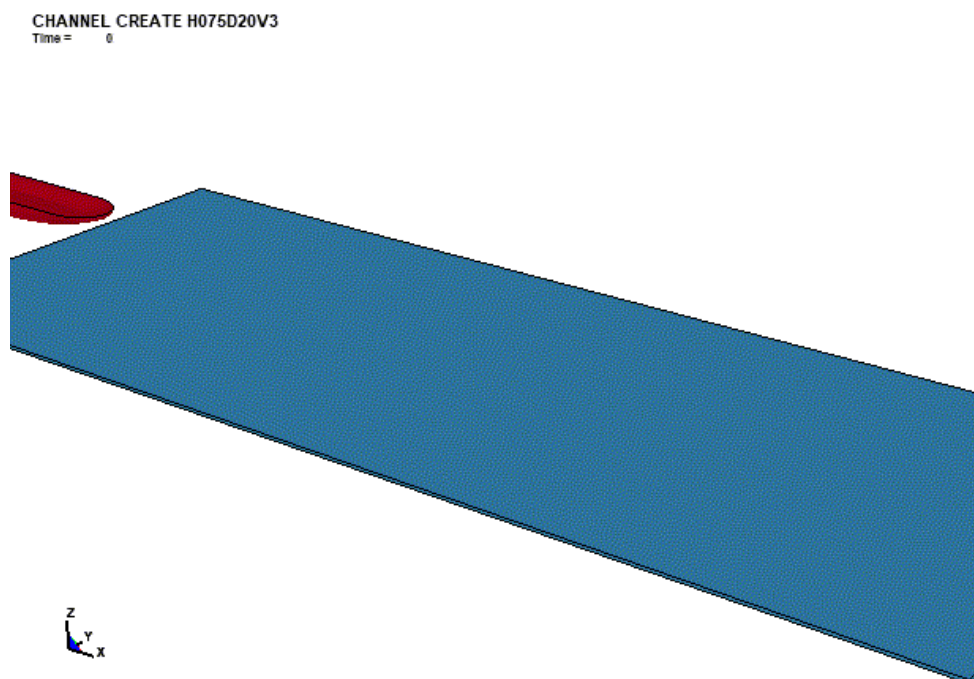


Рис. 3. Взаимный «свал» ледоколов при их параллельной работе в сплошных льдах толщиной 0,75 м на траверзном расстоянии 20 м

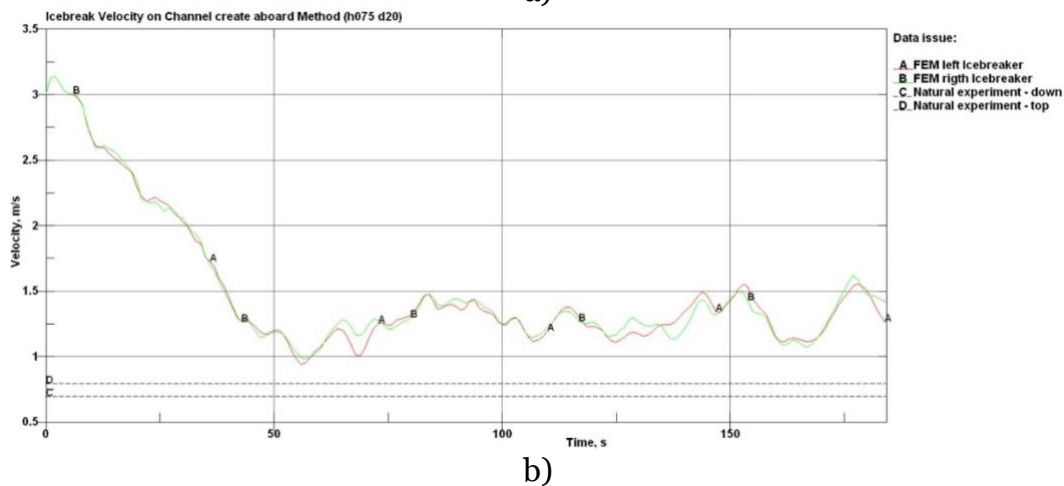
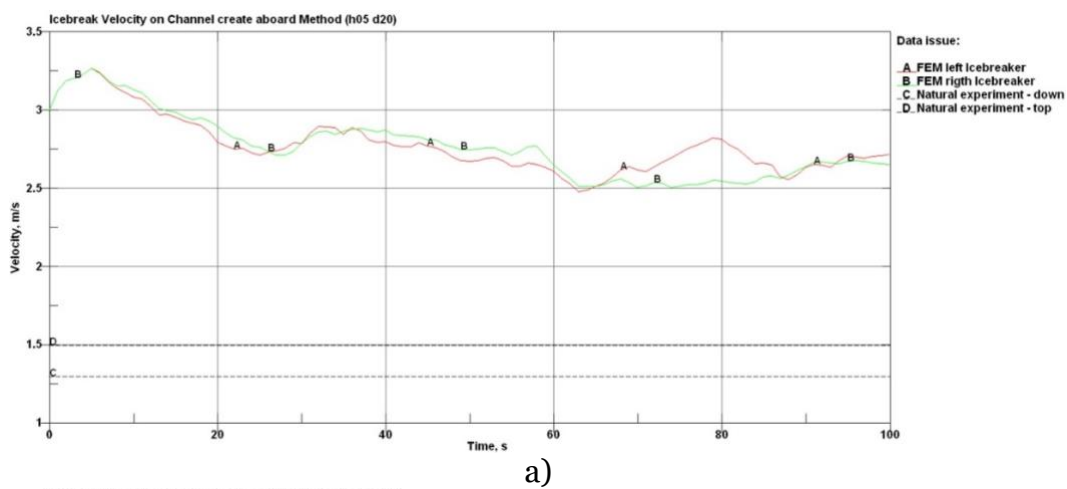


Рис. 4. Ходкость ледоколов проекта 1191 на прокладке канала в сплошных льдах способом «борт к борту»

(а – толщина льда 0,5 м; б – толщина льда 0,75 м)

Однако следует отметить, что в ледовой практике апробированы, широко применяются и описаны в литературе [5-11] только кильватерные счалы ледокольных средств («тандем» и даже в три корпуса). Теоретически обозначенная привлекательность метода работы «борт к борту» требует, как минимум, дискуссионного обсуждения в среде ледовых экспертов и, в первую очередь, с привлечением опытных капитанов ледоколов.

Во всех вариантах в качестве безопасного на прокладке канала зарекомендовал себя метод «уступ» при удовлетворительных параметрах получаемой ледовой трассы (Рис. 5). Но скорость её формирования даже на минимальных дистанциях с частичной «подколкой» головного судна лимитируется ледовой ходкостью ведущего ледокола (Линия В, рис. 6), которая в этом случае практически не улучшается в сравнении с его автономным режимом работы (Линии С и D, рис. 6).

CHANNEL CREATE D20V3 LEDGE
Time = 0



Рис. 5. Совместная прокладка канала ледоколами проекта 1191 методом «уступ» в сплошных льдах толщиной 0,5 м

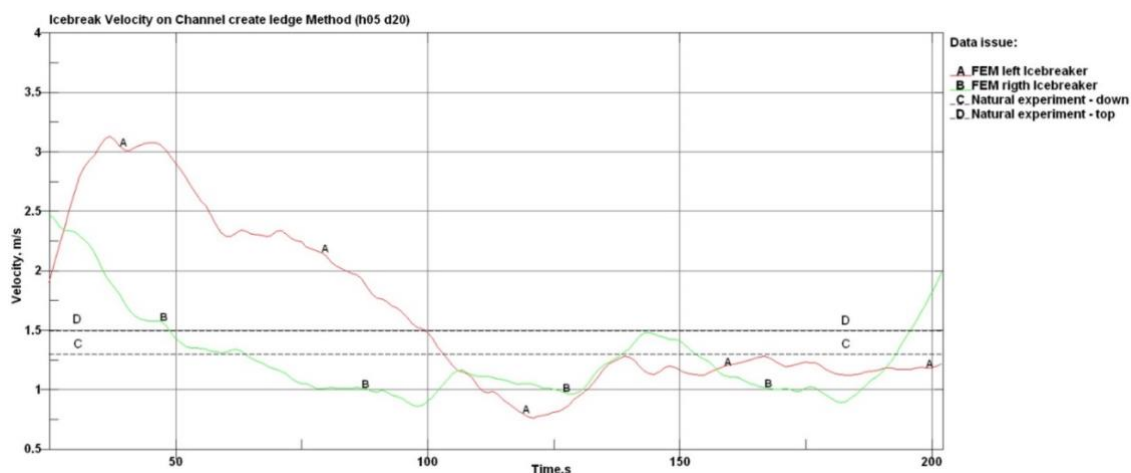


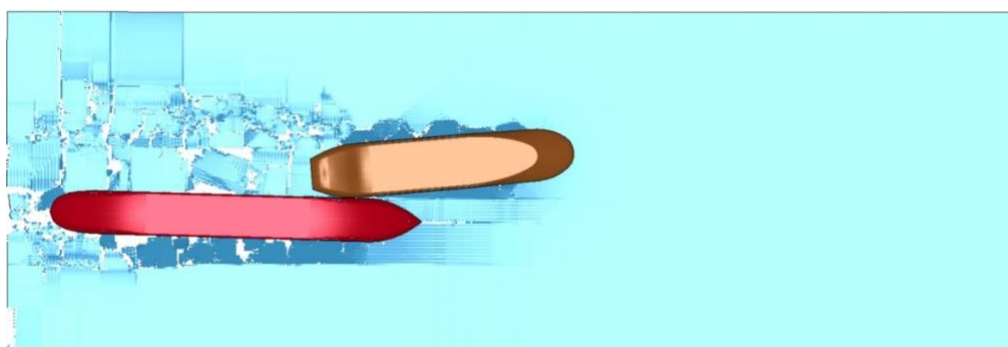
Рис. 6. Ходкость ледоколов проекта 1191 на прокладке канала в сплошных льдах толщиной 0,5 м способом «уступ»

3. Околка транспортного судна

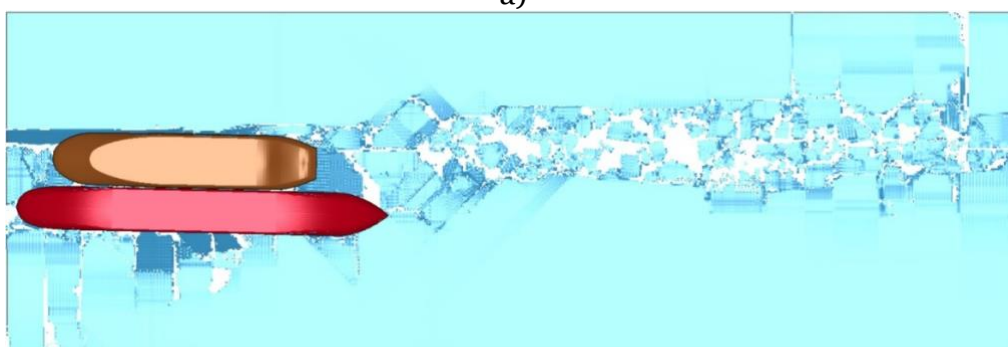
Распространённым видом ледокольных услуг при осуществлении ледовых транспортных операций является околка грузового флота. Оказание помощи неподвижным теплоходам, устойчиво затёртым льдами (на период от нескольких десятков часов до нескольких суток), связано с выполнением ледокольных работ повышенной сложности. Это обусловлено необходимостью маневрирования ледоколов в непосредственной близости от «пленённых» судов.

Однако значительно большую опасность маневрирующий на околке ледокол представляет для малоподвижного судна, перемещающегося с минимально возможной скоростью (менее 0,5 м/с) по уровню ледопроеходимости в предельных сплошных льдах. При этом лёд в ближайших окрестностях судна находится в напряжённо-деформированном состоянии, что может спровоцировать «свал» ледокола на судно.

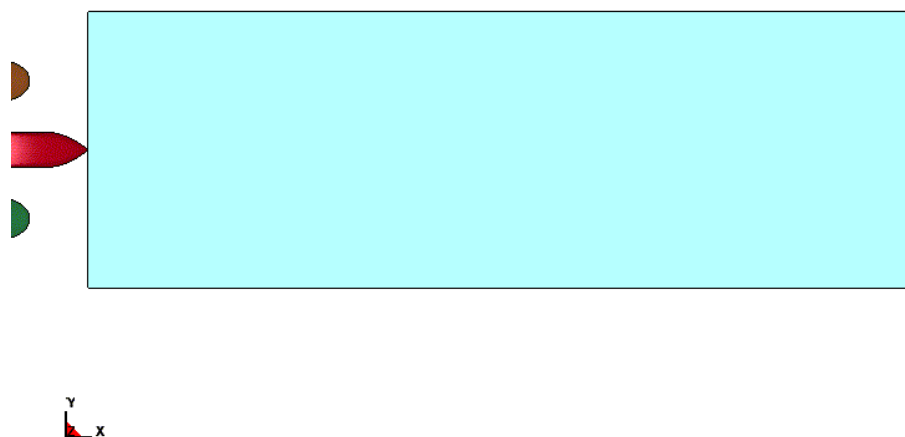
Как показывает численный эксперимент, повышение эффективности оковки в таких условиях требует прохода ледокола на минимальном расстоянии от транспортного судна (не более 10 м). Но в большинстве расчётных вариантов при любых режимах управления ледоколом («с одерживанием», «без одерживания») в этом случае прогнозируется столкновение судов (Рис. 7). Поэтому в целях обеспечения безопасности следует избегать переключений рулевых органов ледокола, установив их в положение «прямо» при прохождении вдоль борта окальваемого судна. Кроме того, на встречных направлениях (Рис. 7б) следует снизить скорость ледокола до уровня самого малого хода (1,2 -1,5 м/с).



a)



b)



с)

Рис. 7. Столкновение ледокола с малоподвижным судном при его околке в сплошных льдах толщиной 0,5 м

(а – попутная околка одним ледоколом на начальном траверзном расстоянии 10 м; б – встречная околка одним ледоколом на начальном траверзном расстоянии 5 м; в – попутная околка двумя ледоколами на начальном траверзном расстоянии 10 м)

Очевидно, что уровень результативности околки грузового судна будет определяться режимом восстановления скорости его движения по заданной маршрутной полосе. Для исследуемого типа транспортного флота эта полоса как эффективная среда движения допускает наличие льдов только тёртых и мелкобитых фракций при их толщине не более 0,5 м. Не всякая работа ледоколов на околке только за один проход может привести к такому состоянию льда в целевом направлении (Рис. 8).

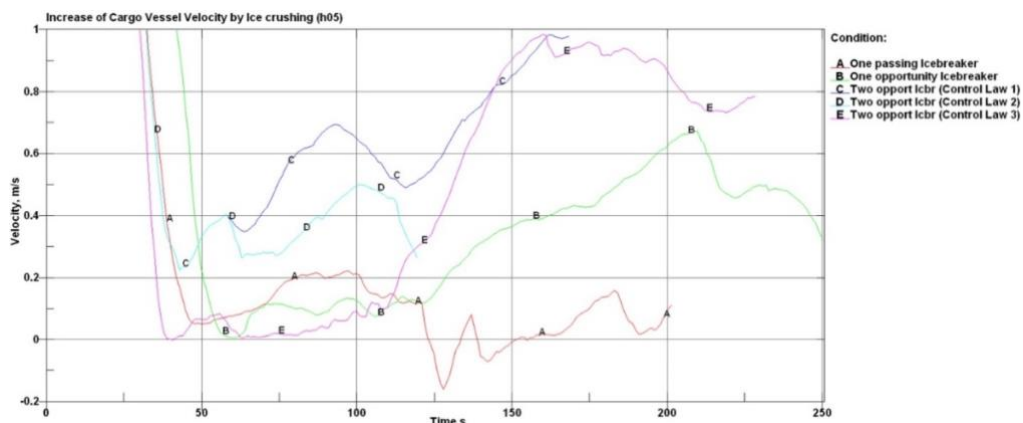


Рис. 8. Восстановление хода транспортного судна при различных режимах его околки ледоколами проекта 1191 в сплошных льдах толщиной 0,5 м

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 8, показывает, что совместная околка транспортного судна ледоколами с обоих бортов, как правило, способствует более быстрому самостоятельному (без буксировки) освобождению и восстановлению его эффективного хода (не менее 0,5 м/с, линии С и Е, рис. 8). Однократный проход

ледокола с какого-либо борта транспорта далеко не всегда обеспечивает достижение этой цели (линии А и В, рис. 8).

4. Выводы

1. Потребность в численном прогнозе последствий совместного маневрирования судов во льдах на малых расстояниях обусловлена отсутствием аналитических методик по описанию динамики развития подобных процессов.

2. Ледокол проекта 1191 имеет неудовлетворительную маршрутную устойчивость в толстых сплошных льдах.

3. Безопасную работу при совместной прокладке канала ледоколами проекта 1191 обеспечивает метод работы «уступ» при удовлетворительных параметрах получаемой ледовой трассы.

4. Теоретическую эффективность прокладки ледового канала в толстых и предельных льдах двумя ледоколами проекта 1191 продемонстрировал приём работы «борт к борту».

5. Наибольшая эффективность и достаточная безопасность околки малоподвижного транспортного судна в толстых сплошных льдах обеспечивается одновременной работой с его обоих бортов двумя ледоколами на минимальном траверсном расстоянии (до 10 м) при попутном движении.

Список литературы

1. V. A. Lobanov, V. S. Pershina. Visualization of CAE-solutions of partial problems of ice navigation. Vessels passing. Scientific Visualization, 2018, volume 10, number 1, pages 89 - 98, DOI: 10.26583/sv.10.1.07 – URL: <http://sv-journal.org/2018-1/07/?lang=en>

2. V. A. Lobanov. Visualization of CAE-solutions of partial problems of ice navigation. Icebreaker sitting and propulsion ability. Scientific Visualization, 2020, volume 12, number 1, pages 48 – 60, DOI: 10.26583/sv.12.1.04. – URL: <http://sv-journal.org/2020-1/04>.

3. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>.

4. Лобанов В.А. Оценки ледовых качеств судов с применением CAE-систем: монография / В.А. Лобанов. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – 296 с.

5. Тронин В.А., Сандаков Ю.А. Работа речного ледокола в тяжёлых весенних льдах. – Речной транспорт, 1966, №12, с. 17-18.

6. Тронин В.А., Сандаков Ю.А. Парная работа судов тяжёлых льдах. – Производственно-технический сборник МРФ, вып. 74. – М: Транспорт, 1969, с. 20-22.

7. Тронин В.А., Поляков А.С., Расторгуев В.В. Результаты испытаний ходовых и маневренных качеств мелкосидящих ледоколов. – Обзорная информация. Продление навигации на внутренних водных путях. – М., 1986, с. 11-16.

8. Тронин В.А., Железнов С.В., Лобанов В.А. прогнозирование безопасных и эффективных сроков ледового плавания судов. – Тр./ГИИВТ. – Горький, 1989, вып. 245, с. 60-93.

9. Эксплуатационно-технические испытания транспортных и ледокольных судов в ледовых условиях с разработкой предложений, обеспечивающих их круглогодичную эксплуатацию. Отчёт о научно-исследовательской работе по теме №XV-3.2/794147. Научные рук. – Тронин В.А., Богданов Б.В. - Горький.: ГИИВТ, 1981. – 262 с.

10. Разработать требования к транспортным судам для обеспечения их работы в ледовых условиях и при устойчивых отрицательных температурах воздуха. Заключительный отчёт о научно-исследовательской работе по теме №XV-2.2/77-396. Научные рук. – Баев А.С., Малый П.А. – Л.: ЛИВТ, 1980. – 209 с.

11. Темникова, А. А. Оценка работы ледокольного флота в Волго-Каспийском морском судоходном канале // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2014. - №4.-С. 29-33.

Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels

Vasiliiy A. Lobanov¹, Yulia R. Guro-Frolova²

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Water Transport» (FSFEI HE VSUWT), Russia

¹ ORCID: 0000-0002-0931-7317, lobbas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-6048-8576, business_box_2@mail.ru

Abstract

The article notes that ensuring efficiency and safety of ice transport operations on the water transport is distinguished by a wide range of necessary actions, maneuvers, modes and dynamic working methods of the vessels. The assessment of vessel ice performance in special operating conditions is of current interest.

Using CAE technologies the range of actual tasks of vessel movement and joint maneuvering in different ice and navigational conditions is considered: the prediction of forming speed and qualitative condition of the ice channel in thick and limit compact ices due to different tactical working methods of several icebreakers; the efficiency and safety of the slow-moving transport vessel icebreaking assistance in compact ices.

Due to the result analysis of multiple CAE modeling recommendations for the operation of the studied icebreaker and cargo fleet of different ice categories are given. These recommendations concern the choice of safe maneuvering distances, vessel control laws, performance of standard operations.

Keywords: ice conditions, ice channel, icebreaker, ice-class vessel, CAE-system, finite element modeling.

References

1. V. A. Lobanov, V. S. Pershina. Visualization of CAE-solutions of partial problems of ice navigation. Vessels passing. Scientific Visualization, 2018, volume 10, number 1, pages 89 - 98, DOI: 10.26583/sv.10.1.07 – Access mode: <http://sv-journal.org/2018-1/07/?lang=en>
2. V. A. Lobanov. Visualization of CAE-solutions of partial problems of ice navigation. Icebreaker sitting and propulsion ability. Scientific Visualization, 2020, volume 12, number 1, pages 48 – 60, DOI: 10.26583/sv.12.1.04. – URL: <http://sv-journal.org/2020-1/04>.
3. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – URL: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>.
4. Lobanov V.A. Otsenki ledovykh kachestv sudov s primeneniem CAE-sistem: monografiya / V.A. Lobanov. – N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT», 2013. – 296 s.
5. Tronin V.A., Sandakov YU.A. Rabota rechnogo ledokola v tyazhelykh vesennikh l'dakh. – Rechnoi transport, 1966, №12, s. 17-18.
6. Tronin V.A., Sandakov YU.A. Parnaya rabota sudov tyazhelykh l'dakh. – Proizvodstvenno-tekhnicheskii sbornik MRF, vyp. 74. – M: Transport, 1969, s. 20-22.
7. Tronin V.A., Polyakov A.S., Rastorguev V.V. Rezul'taty ispytaniy khodovykh i manevrennykh kachestv melkosidyashchikh ledokolov. – Obzornaya informatsiya. Prodlenie navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh. – M., 1986, s. 11-16.
8. Tronin V.A., Zheleznov S.V., Lobanov V.A. prognozirovanie bezopasnykh i ehffektivnykh srokov ledovogo plavaniya sudov. – Tr./GIIVT. – Gor'kii, 1989, vyp. 245, s. 60-93.

9. Eksploatatsionno-tehnicheskie ispytaniya transportnykh i ledokol'nykh sudov v ledovykh usloviyakh s razrabotkoy predlozheniy, obespechivayushchikh ikh kruglogodovuyu eksploatatsiyu. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po teme №XV-3.2/794147. Nauchnye ruk. – Tronin V.A., Bogdanov B.V. - Gor'kiy.: GIIVT, 1981. – 262 s.

10. Razrabotat' trebovaniya k transportnym sudam dlya obespecheniya ikh raboty v ledovykh usloviyakh i pri ustoychivyykh otritsatel'nykh temperaturakh vozdukha. Zaklyuchitel'nyy otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po teme №XV-2.2/77-396. Nauchnye ruk. – Baev A.S., Malyy P.A. – L.: LIVT, 1980. – 209 s.

11. Temnikova, A. A. Otsenka raboty ledokol'nogo flota v Volgo-Kaspiiskom morskoye sudokhodnom kanale // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2014. – №4. – s. 29-33.