

Визуализация САЕ-решений частных задач ледового судоходства. Посадка и ходкость ледокола

В.А. Лобанов¹

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

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

Аннотация

В статье подчёркнуто, что эксплуатацию ледокольных средств при обеспечении эффективности и безопасности ледовых транспортных услуг отличает широкий спектр необходимых операций, действий, маневров, режимов и динамических приёмов работы. Это сохраняет актуальной проблему оценки их ледовых качеств в особых условиях эксплуатации. В работе с применением САЕ-моделирования исследован процесс движения в сплошных, мелкобитых и тёртых льдах многовального мелкоосидающего ледокола проекта 1191 в различных вариантах сочетаний его осадки, крена и дифферента. Отмечены качественные особенности влияния посадки на характер взаимодействия судна с ледяной средой. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных по ледовым нагрузкам на корпусе и движительно-рулевым комплексе. Даны количественные оценки влияния посадки судна на его суммарное ледовое сопротивление.

Ключевые слова: ледокол, движительно-рулевой комплекс, ледовые условия, ледовый канал, 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 [4].

К настоящему времени апробирован достаточный ряд аналитических, полуэмпирических и численных методик прогноза ледового сопротивления, ледопроеходимости и ходкости судов [1-7]. Поверенные достоверным эмпирическим материалом они дают приемлемый уровень адекватности при анализе ледовых проблем эксплуатационного характера. Однако необходимо указать, что применимость подобных методик справедлива только для «ровнопосаженных» судов при их проектной осадке. При этом дифферент и крен как факторы корпусного ледового сопротивления и нагрузок на движительно-рулевым комплексе (ДРК) не рассматриваются в принципе. Это обусловлено тем, что фактически транспортное судно, имеющее ледовый класс, следует загружать на уровень проектной осадки (наиболее прочной части его «ледового пояса»). Поэтому для ледовокатегорийного грузового флота можно оправдать «методическое игнорирование» посадки судна как аргумента, сказывающегося на ледовой ходкости.

Эксплуатацию ледокольных средств в сравнении с грузовыми судами отличает значительно более широкий спектр режимов и динамических приёмов работы. При этом натурные наблюдения за работой флота во льдах [8, 9] демонстрируют актуальность периодических режимов движения ледоколов с изменённой посадкой, что сохраняет актуальной проблему прогноза ледовой маневренности и ходкости для таких условий их эксплуатации.

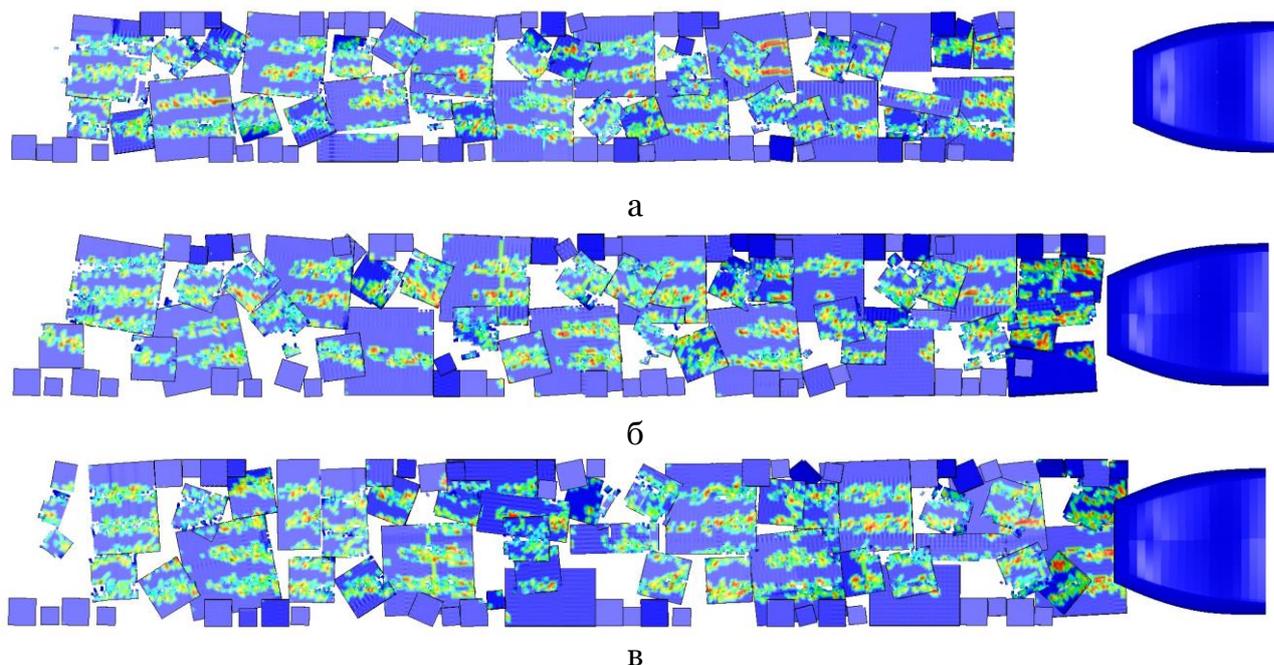
Научно-техническая деятельность автора связана с оценками ледовых качеств судов внутреннего и прибрежного плавания, большая часть которых по ледовым критериям классификационных обществ не превышает уровень «Ice-1» («Лёд-40»). Приемлемая безопасность и эффективность ледовой эксплуатации такого флота может быть гарантирована лишь в условиях тёртых льдов и ледяной каши. Формирование такой ледяной среды для работы флота с низкими (неарктическими) ледовыми категориями обеспечивается ледокольными средствами с многовальными ДРК. В качестве такого средства для внутренних водных путей и прибрежных морских районов следует отметить ледокол проекта 1191 типа «Капитан Евдокимов».

При достаточной изученности ледового потенциала этого судна [8], автором не найдено какой-либо информации по количественным оценкам влияния его посадки на ледовую ходкость. В настоящее время потребностям в решении частных задач ледокольных работ препятствуют ограничения в реализации натуральных испытаний ледоколов. Модельный эксперимент в ледовых бассейнах для этих целей в качестве альтернативы натуре не всегда можно рекомендовать по ряду его недостатков, главным из которых является несовершенство модельного льда (и, особенно, при рассмотрении взаимодействия ДРК со льдом). Невозможность разделения ледового и гидродинамического воздействия на корпусе судна и его ДРК, выявления составляющих ледовых нагрузок (на корпусе, винтах, рулях) также является существенным лимитированием для получения репрезентативных данных в обоих вышеупомянутых случаях.

Опыт автора показывает, что при отсутствии надёжной натурной или эмпирической информации эти решения допустимо получать с использованием САЕ-технологий [4, 10, 11, 12]. Ниже это проиллюстрировано итогами очередной серии САЕ-ледовых испытаний мелкоосидающего ледокола при различных вариантах его посадки.

2. Характер ледового взаимодействия

Качественный анализ САЕ-симуляции работы ледокола в *мелкобитых льдах* показал, что в реальном «рабочем» (безопасном) интервале изменения дифферента, крена и осадки судна не стоит ожидать ощутимых межвариантных особенностей ледовых нагрузок на взаимодействующих конструктивных элементах (корпусе, двигателях, рулях). Это доступно поясняет рис. 1.



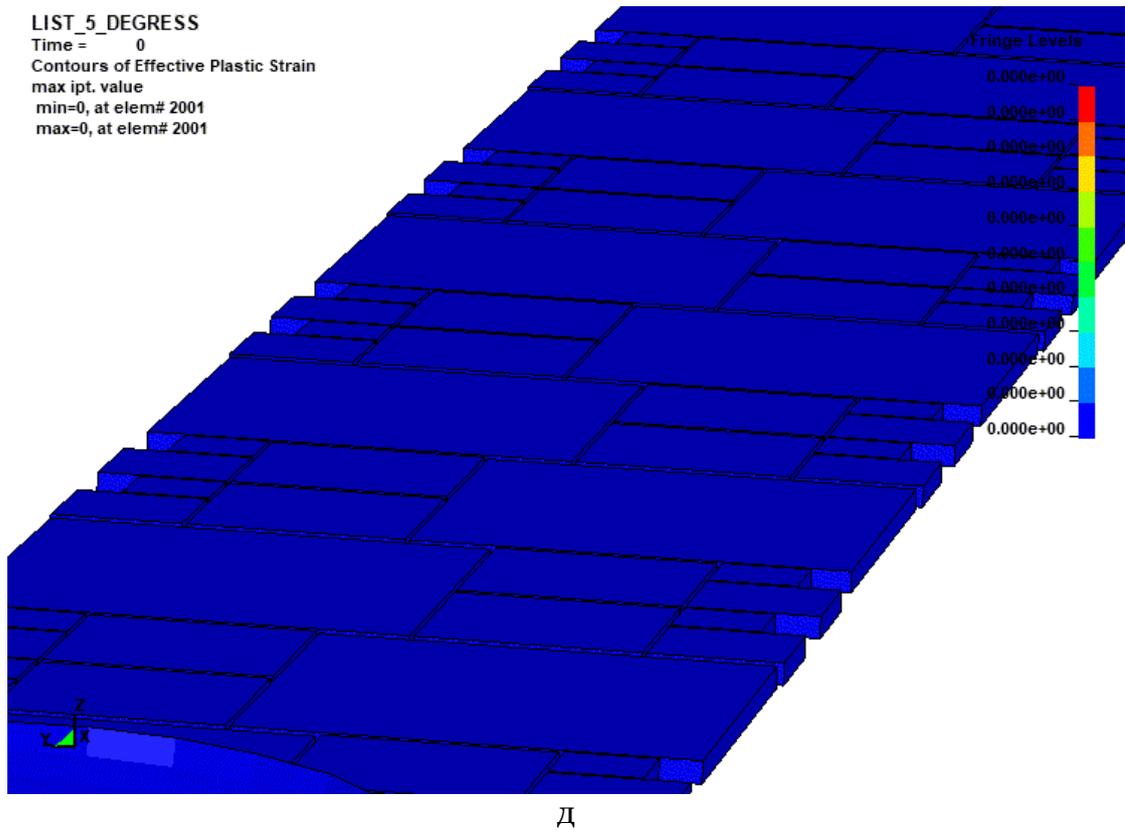
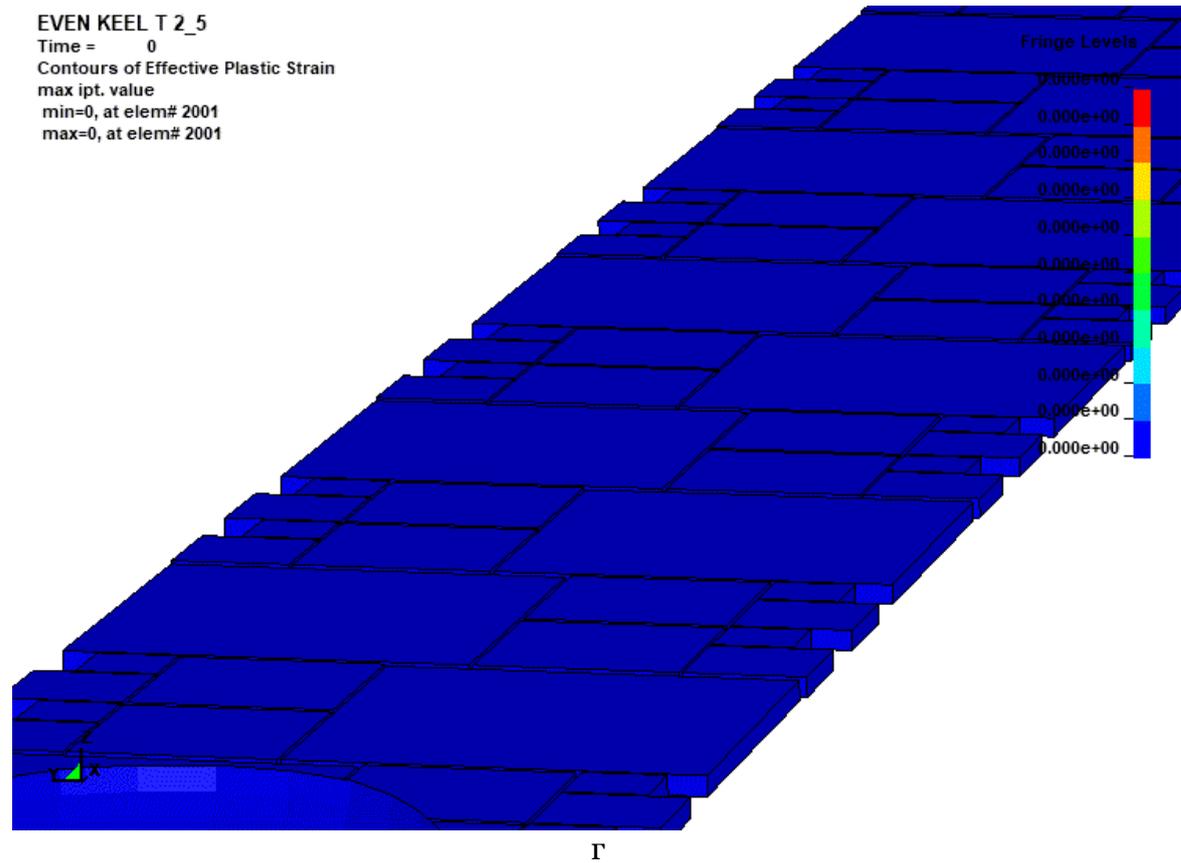
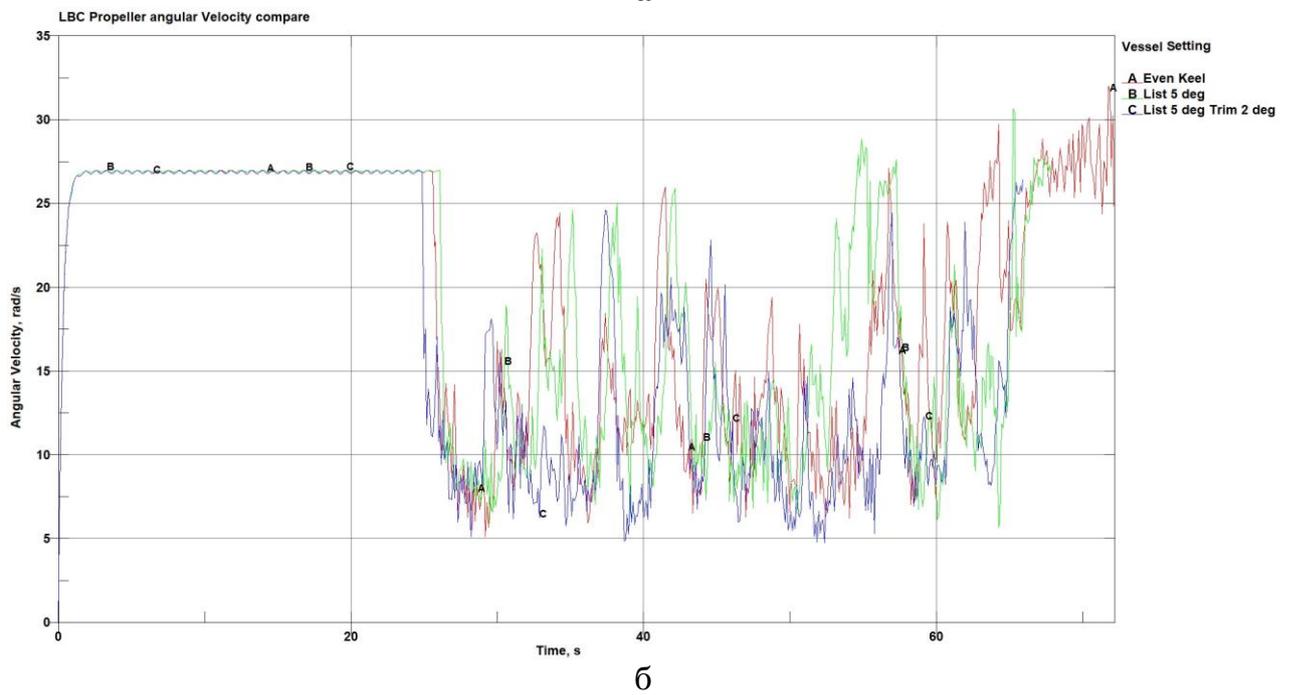
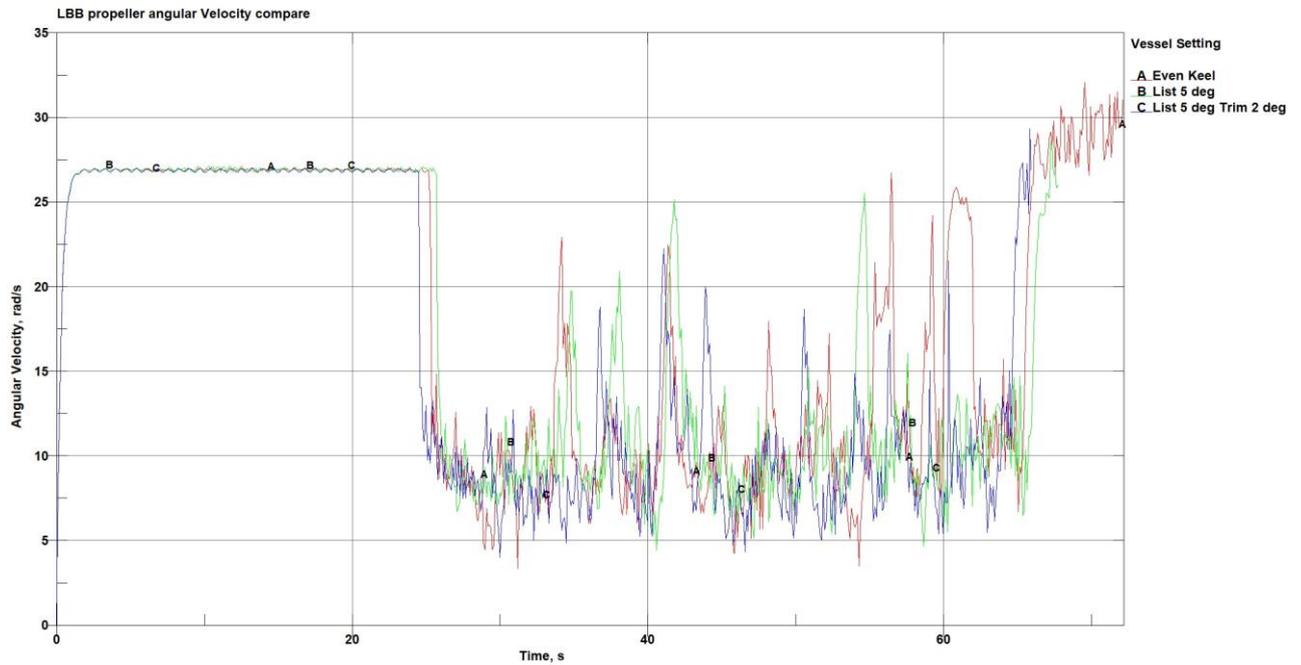
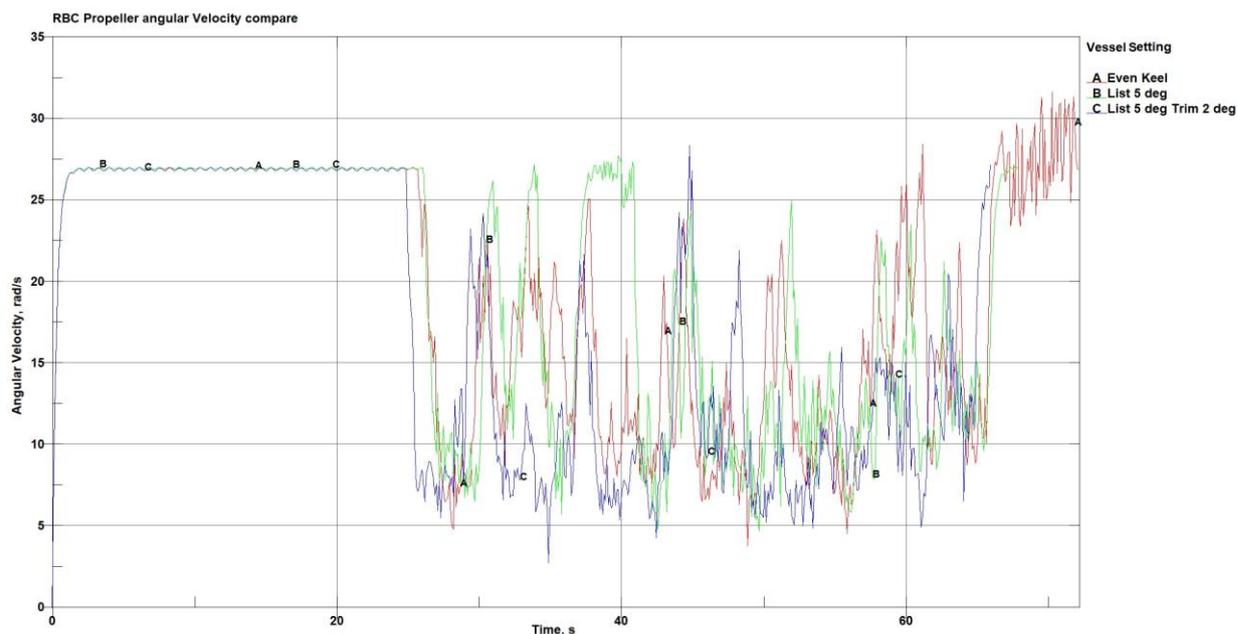


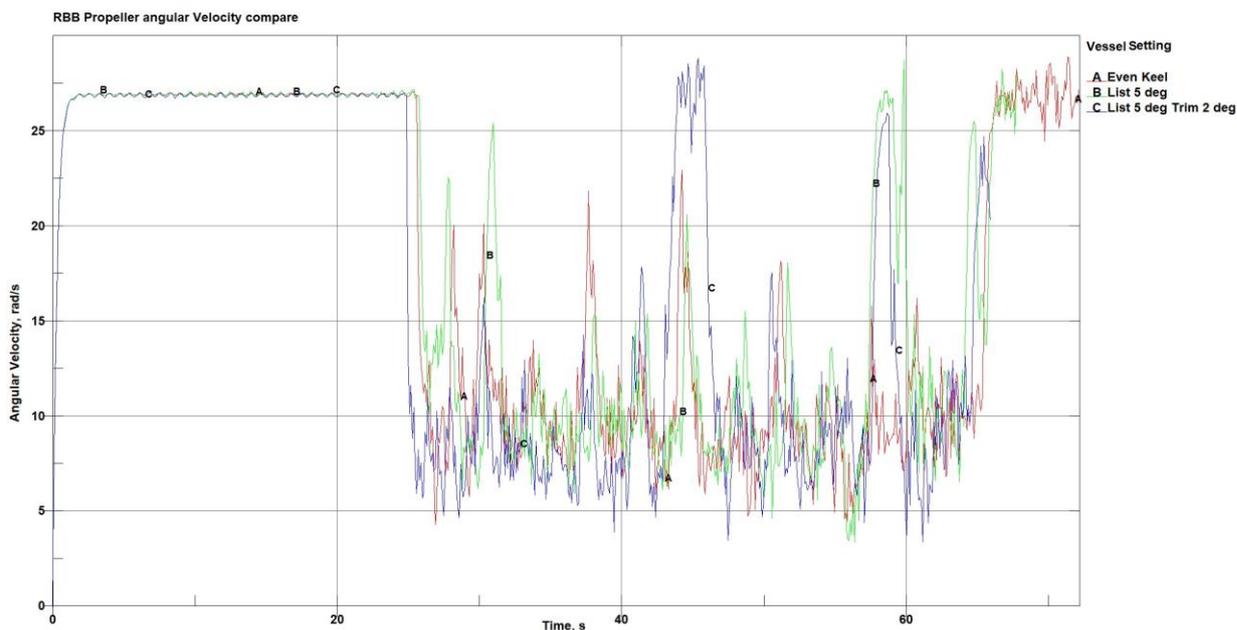
Рис. 1. Состояние «модельных» каналов в мелкобитых льдах при различных вариантах посадки ледокола
 (а, г – посадка на «ровный киль» при проектной осадке 2,5 м; б, д – крен 5 градусов;
 в – крен 5 градусов, дифферент на корму 2 градуса)

По виду «модельных» ледовых каналов (характеру распределения льдов, их раздробленности и сплочённости, рис. 1) можно судить о слабой связи посадки судна с состоянием ледовой трассы после прохождения ледокола. Это предположение качественно (Рис. 1г, 1д) и количественно (Рис. 2) также подтверждается анализом режимов работы гребных винтов судна.





В



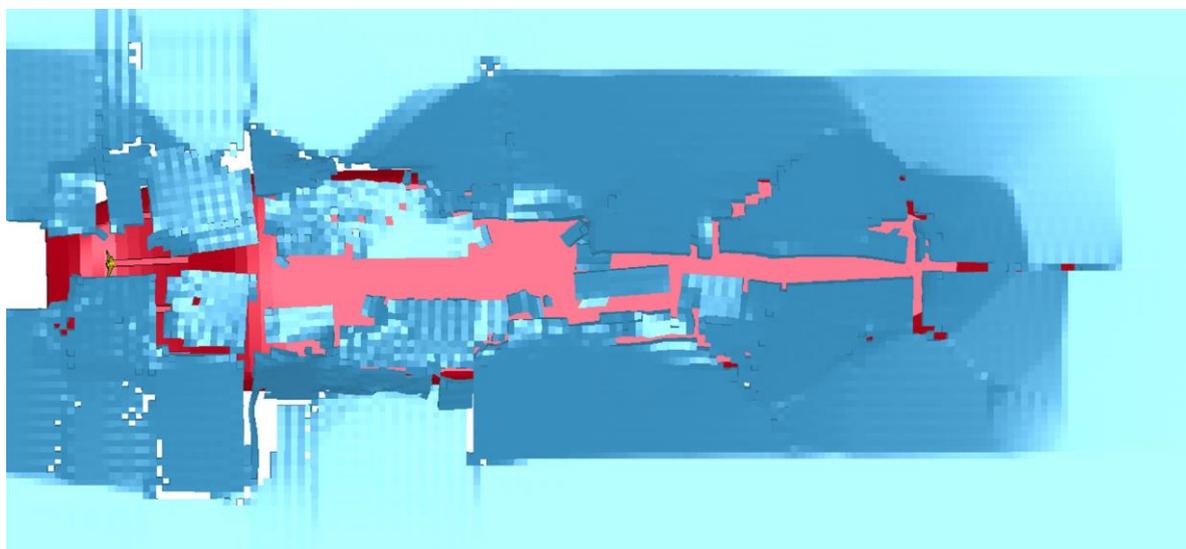
Г

Рис. 2. Временной характер частоты вращения движителей при различных вариантах посадки ледокола
 (а – наружный левобортный винт; б – внутренний левобортный винт;
 в – внутренний правобортный винт; г – наружный правобортный винт)

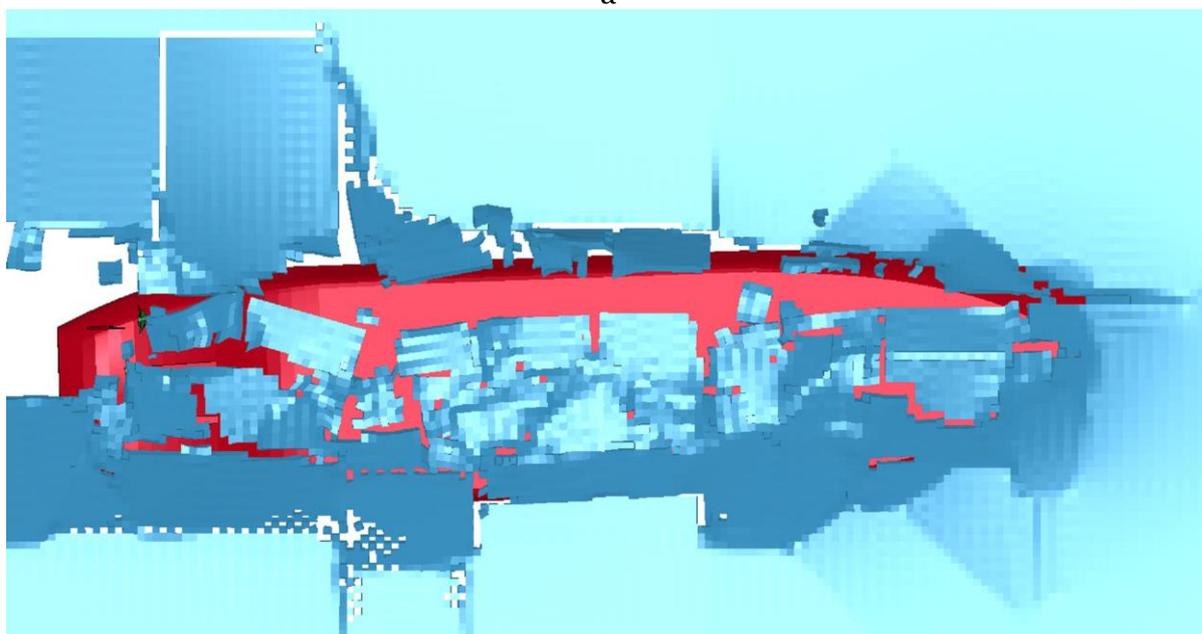
На рис. 2 последнее проиллюстрировано несколькими приёмами преодоления ледоколом ледовой перемычки из мелкобитых льдов толщиной 0,5 м и сплочённостью 9-10 баллов при индивидуальной посадке судна в каждом варианте. Анализ осциллограмм рис. 2 показывает, что временной характер частоты вращения всякого винта (кривые А - посадка судна на «ровный киль» при расчётной осадке 2,5 м; кривые В – крен судна на 5 градусов; кривые С – крен судна 5 градусов, дифферент на корму 2 градуса) сохраняет характерную неустойчивость в каждом из трёх упомянутых вариантов посадки ледокола. Также следует указать на то, что во всех расчётных вариантах САЕ-испытания

предсказывают практически непрерывный контакт всего ДРК судна с ледяным покровом, «обтекающим» корпус.

Качественные межвариантные особенности непосредственно процесса взлома **сплошного льда** более очевидны по сравнению с мелкобитыми льдами (Рис. 3), но однозначное опознавание *проложенных ледовых каналов* по признаку посадки ледокола далеко не всегда доступно даже опытному ледовому капитану или гидрологу (Рис. 4а, 4б).



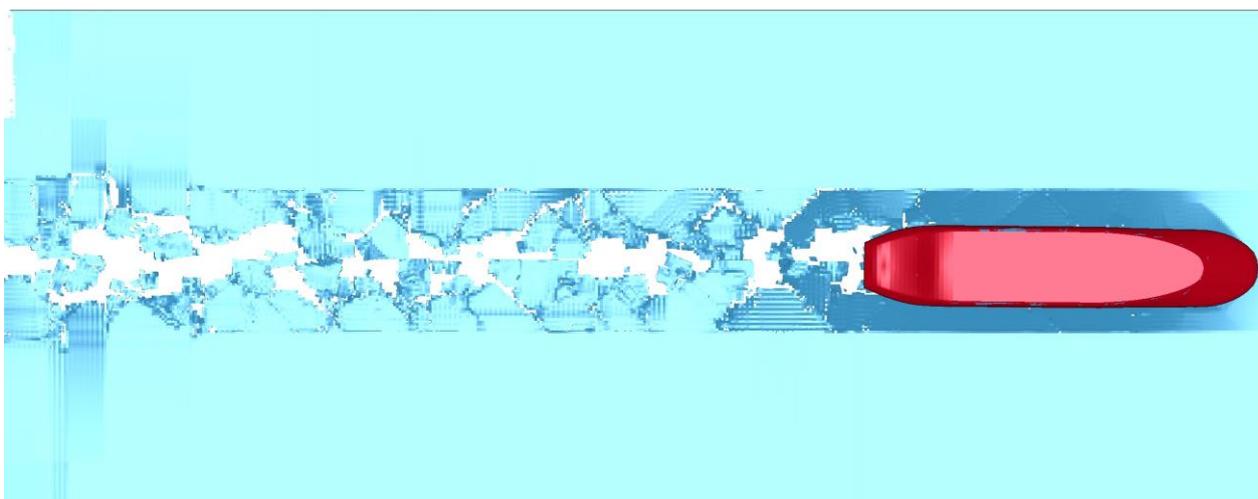
а



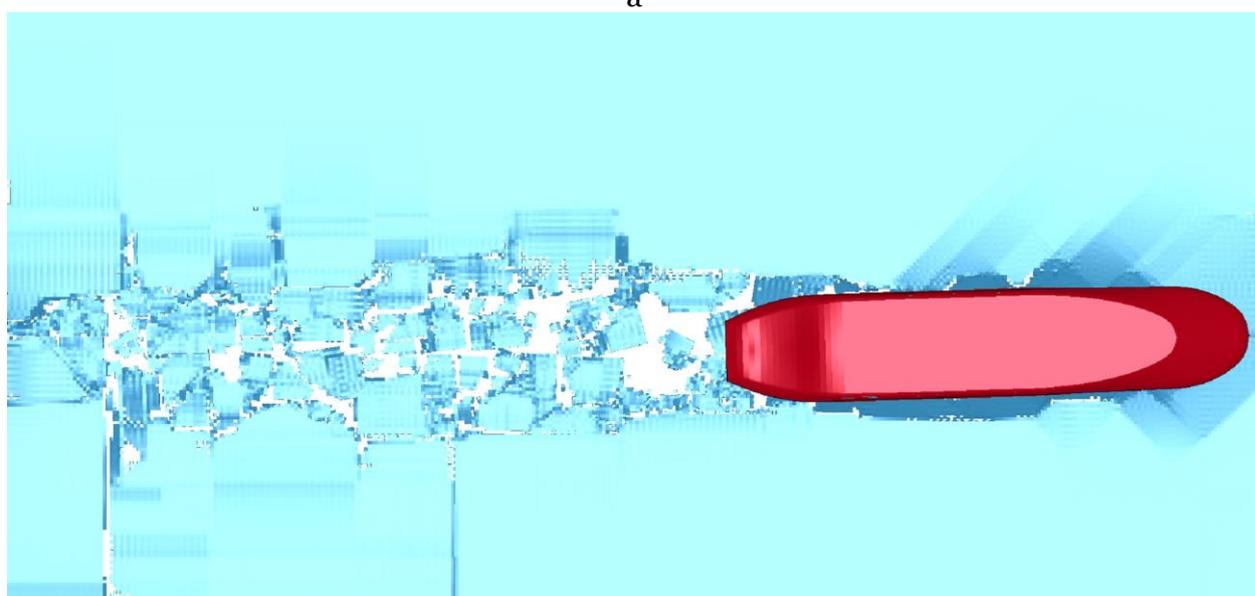
б

Рис. 3. Характер взлома сплошного льда при различных вариантах посадки ледокола (вид снизу)

(а – посадка на «ровный киль» при проектной осадке 2,5 м; б – крен 5 градусов)



а



б



в

Рис. 4. Качественное состояние «модельных» каналов в сплошных льдах при различных вариантах посадки ледокола
(а – посадка на «ровный киль» при проектной осадке 2,5 м;
б – дифферент на корму 2 градуса; в – крен 5 градусов)

Следует отметить, что наличие крена вызывает стохастические флуктуации поперечных ледовых корпусных нагрузок. Последнее ухудшает маршрутную устойчивость ледокола [10] при движении в сплошном ледяном покрове, что явно может отразиться на форме и состоянии ледового канала (Рис. 4в). При этом уже на качественном уровне отмечается снижение скорости хода по отношению к варианту посадки «на ровный киль» (Рис. 5, кривые В и А соответственно).

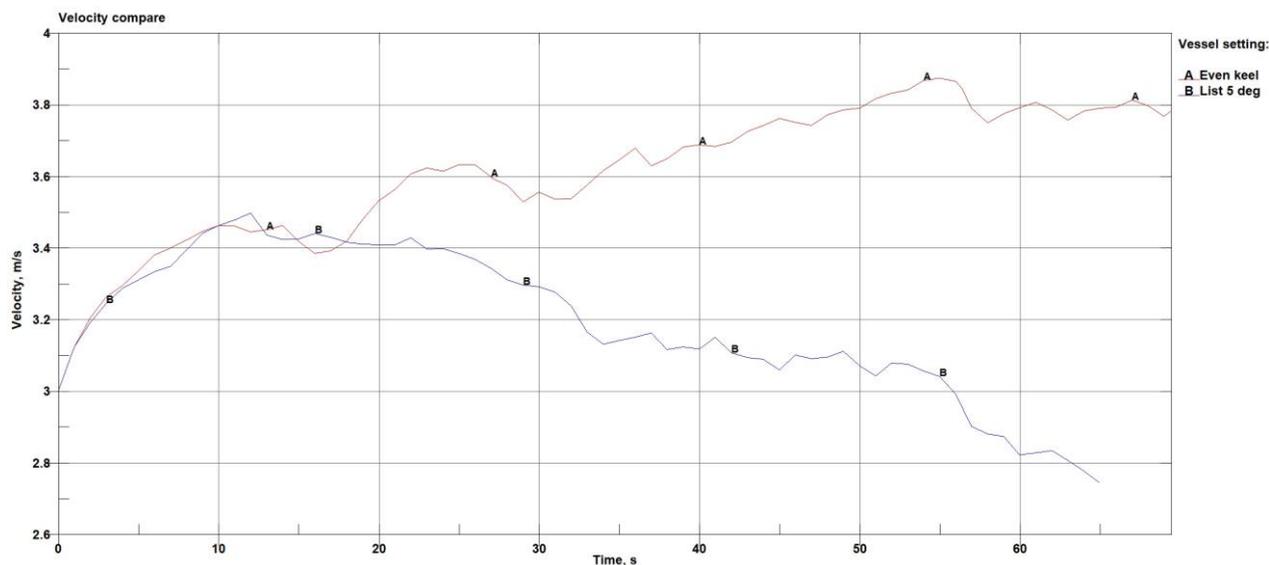


Рис. 5. Временной характер скорости движения ледокола в сплошных льдах при различных вариантах его посадки

Особенностям в характере движения и динамике разнопосаженного ледокола в сплошных льдах, проиллюстрированным на рис. 4 и 5, с высокой степенью вероятности сопутствуют межвариантные различия в ледовых нагрузках на корпусе судна и его ДРК.

3. Ледовое сопротивление

Количественные итоги САЕ-оценок результирующего ледового сопротивления ледокола в *мелкобитых льдах* для нескольких вариантов его посадки показаны на рис. 6.

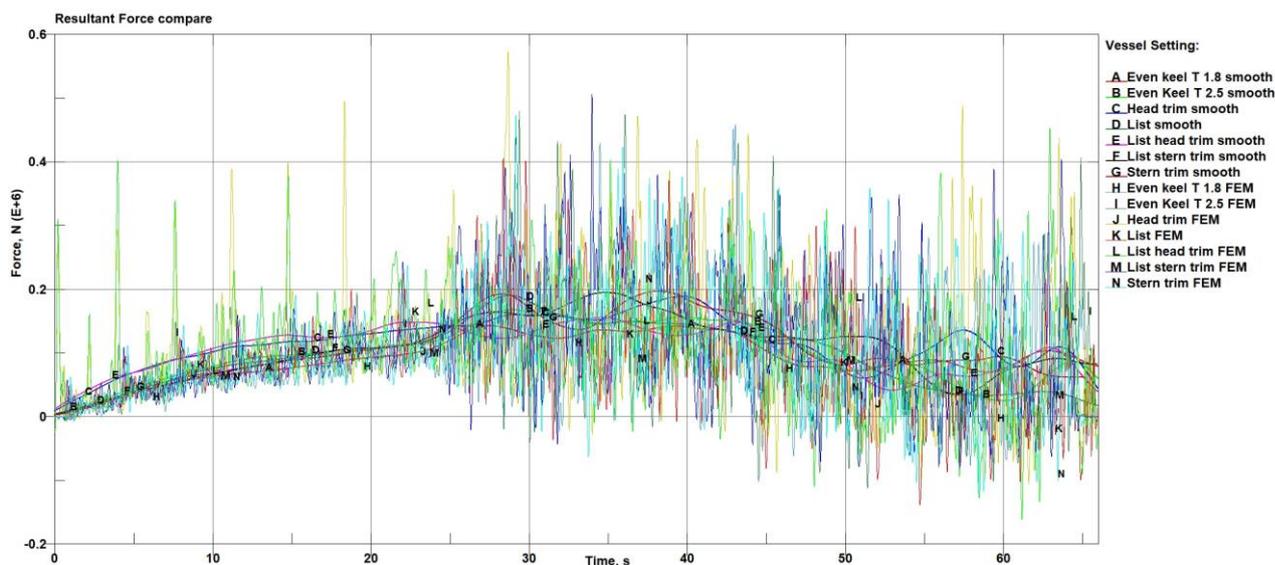


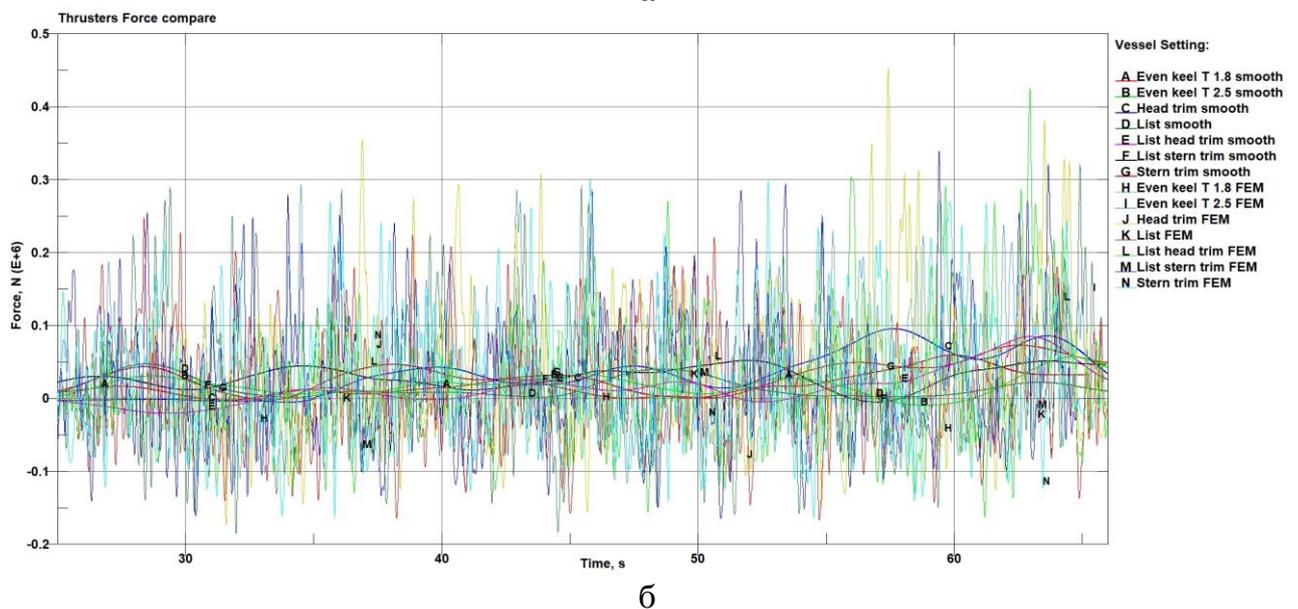
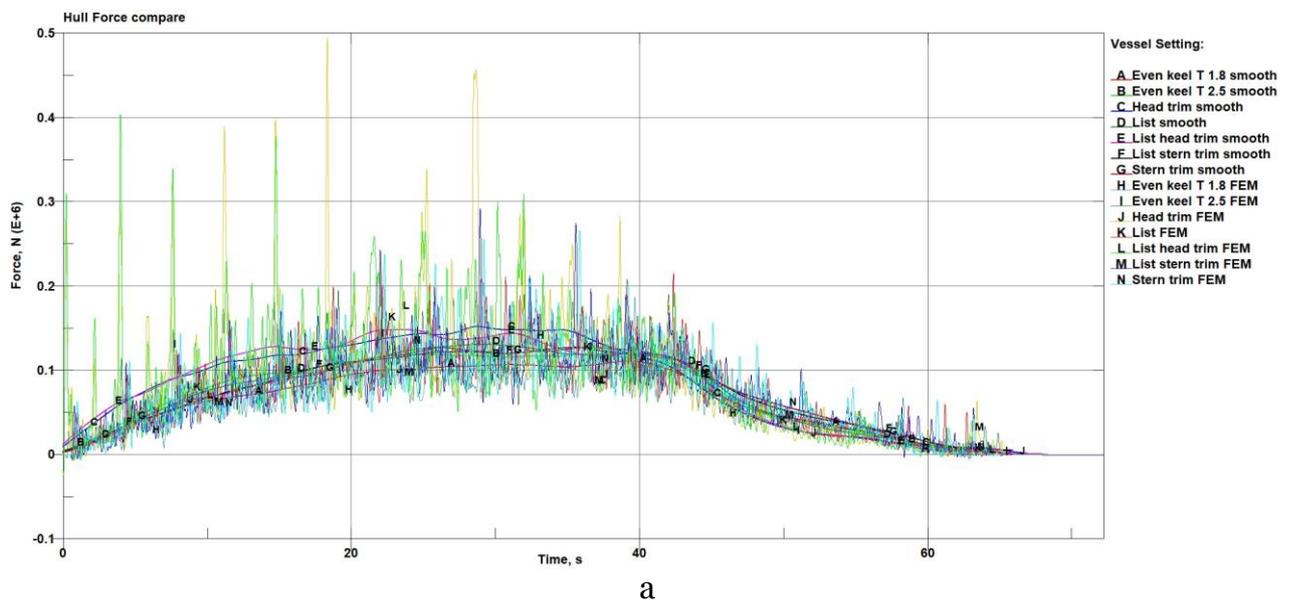
Рис. 6. Сравнение ледового сопротивления ледокола в мелкобитых льдах при различных вариантах его посадки (А – посадка на «ровный киль» при осадке 1,8 м, сглаженные значения; В – посадка

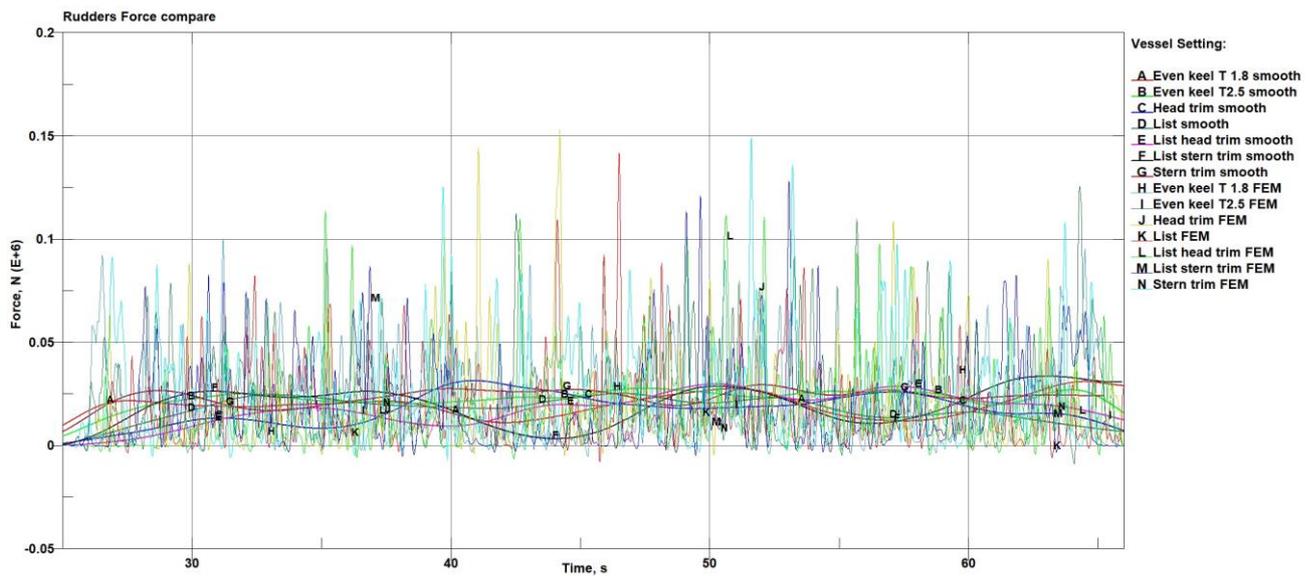
на «ровный киль» при осадке 2,5 м, сглаженные значения; С – дифферент на нос 2 градуса, сглаженные значения; D – крен 5 градусов, сглаженные значения; E – дифферент на нос 2 градуса и крен 5 градусов, сглаженные значения; F – дифферент на корму 2 градуса и крен 5 градусов, сглаженные значения; дифферент на корму 5 градусов, сглаженные значения;

H-N – соответственно кривым A-F результаты САЕ-моделирования)

По анализу сглаженных кривых (Рис. 6, кривые A-F) можно судить, что уровень суммарного ледового сопротивления судна индивидуален в каждом варианте его посадки. При этом единовременные различия в ледовых нагрузках могут принимать значимые величины (Рис. 6, это наиболее очевидно после ~ 25 с, когда судно полностью «углубляется» в ледовое поле и, кроме корпуса, начинается активный контакт со льдами движителей и рулей ледокола). Однако во времени эти различия имеют знакопеременный характер, свидетельствующий о том, что корреляция посадки ледокола с уровнем его суммарного ледового сопротивления незначима.

Разделение ледового сопротивления по конструктивным составляющим (корпус, рули, движители) показывает характер ледовых нагрузок, аналогичный рис. 6 (Рис. 7, обозначения кривых соответствуют рис. 6).





В

Рис. 7. Сравнение составляющих ледового сопротивления ледокола в мелкобитых льдах при различных вариантах его посадки
(а – ледовое сопротивление корпуса; б – ледовое сопротивление винтов; в – ледовое сопротивление рулей)

При этом особо следует обратить внимание на знакопеременный характер ледового сопротивления гребных винтов (Рис. 7б). Значительная стохастичность *одновременного* взаимодействия с ледяной средой четырёх движителей даёт сравнительно низкий уровень (немногоим более 5%) этой составляющей ледового сопротивления в общем балансе продольных ледовых нагрузок на судно.

В отношении **сплошного ледяного покрова** на данном этапе исследований можно однозначно констатировать только о влиянии крена на ледовое сопротивление ледокола (Рис. 8).

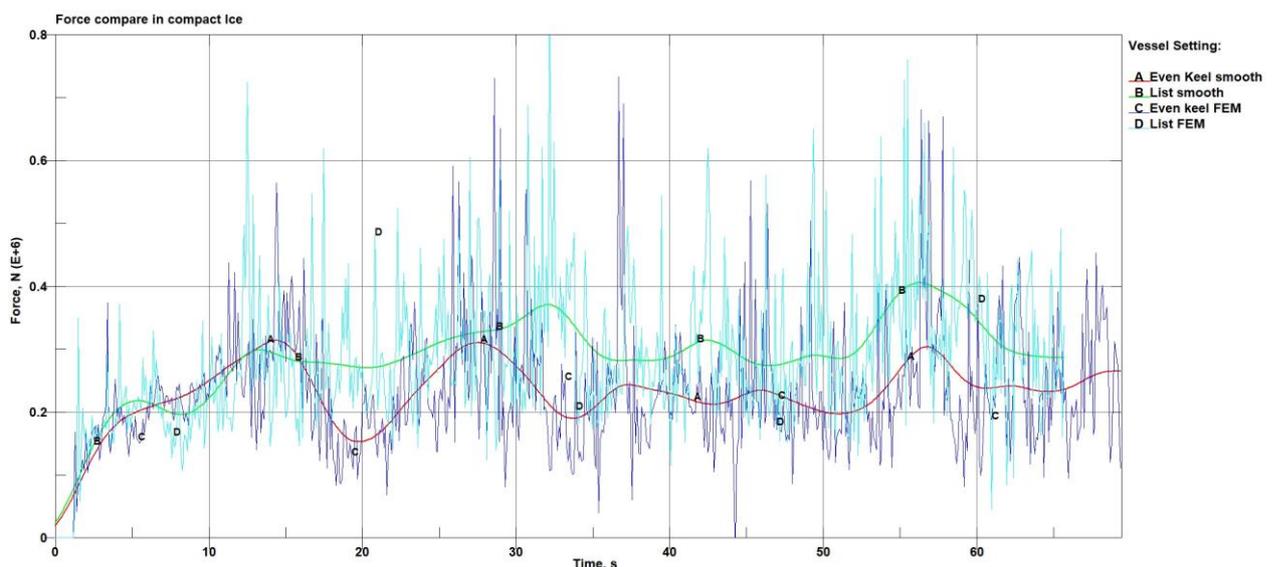


Рис. 8. Сравнение ледового сопротивления ледокола в сплошных льдах при различных вариантах его посадки
(А – посадка на «ровный киль» при осадке 2,5 м, сглаженные значения; В – крен 5 градусов, сглаженные значения; С-Д – соответственно кривым А-В результаты САЕ-моделирования)

При этом в безопасном диапазоне этого параметра отмечается ощутимый прирост суммарного ледового сопротивления судна (25-30%) по сравнению с его посадкой на «ровный киль» (Рис. 8, сравнение кривых А и В).

4. Выводы

1. При невозможности реализации натуральных ледовых испытаний судов надёжной альтернативой определения их специальных ледовых качеств остаётся модельный эксперимент (в том числе и виртуальный).
2. Распределение мелкобитых льдов и их раздробленность в «модельных» ледовых каналах указывают на слабую корреляцию посадки судна и качественного состояния канала за ледоколом, а функциональная связь его посадки с уровнем суммарного ледового сопротивления незначима.
3. Для сплошных льдов САЕ-эксперименты прогнозируют только влияние крена на ледовое сопротивление судна.

Список литературы

1. Akihisa Konno, Akihiro Nakane, Satoshi Kanamori. Validation of numerical estimation of brash ice channel resistance with model test. Proceedings of the 22 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, 2013, Espoo, Finland. – Access mode: http://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_143.pdf
2. Anthony F. Molland., Stephen R. Turnock., Dominic A. Hudson. Ship Resistance and Propulsion: practical estimation of ship propulsive power. – New York: Cambridge University Press. 2011. – 537 p. – Access mode: [http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%2oresistance%2oand%2opropulsion%2o_%2oF.Molland%2o\(2011\).pdf](http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%2oresistance%2oand%2opropulsion%2o_%2oF.Molland%2o(2011).pdf)
3. Junji Sawamura, Ryouhei Kikuzawa, Takashi Tachibana, Masaya Kunigita. Numerical investigation of the ice Force Distribution around the Ship Hull in level Ice. Proceedings of the 21 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. July 10-14, 2011, Montreal, Canada. – Access mode: <http://www.poac.com/PapersOnline.html>
4. 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](https://doi.org/10.26583/sv.10.1.07) – Access mode: <http://sv-journal.org/2018-1/07/?lang=en>
5. Е.М. Appolonov, К.Е. Sazonov, А.А. Dobrodeev, N.Yu. Klementieva, М.А. Kudrin, Е.А. Maslich, V.O. Petinov, V.M. Shaposhnikov. Studies to develop technologies for making a wider channel in ice. Proceedings of the 22 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, 2013, Espoo, Finland. – Access mode: http://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_041.pdf
6. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное. – СПб.: Судостроение, 2014. – 504 с., ил.
7. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
8. 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.
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. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Управляемость. Вестник научно-технического развития, №8, 2012. Электронный журнал, № гос. рег.

0421200120, ISSN 2070-6847. – Режим доступа:

<http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=619>

11. Лобанов В.А. Разработка с применением САЕ-систем нормативных документов по безопасности ледового плавания судна //Интернет-журнал «Наукоедение». 2013 №4 (17) [Электронный ресурс]. – М. 2013. – с. 1-14. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/71tvn413.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
12. Hallquist J.O. LS-DYNA 950. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. LSTC Report 1018. Rev. 2. USA, 2001. – 498 p.

Visualization of CAE-solutions of partial problems of ice navigation. Icebreaker setting and propulsion ability

V.A. Lobanov¹

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

Abstract

The article is devoted to ice navigation with particular emphases on the operation of ice-breaking that ensures efficiency and safety of ice transport services. The ice transport services are distinguished by a wide range of necessary operations, actions, maneuvers, the modes and dynamic working methods. It reserves a burning relevant a problem of assessment of ice performances in special operating conditions. In this work CAE modeling of the movement in continuous ices, ice cakes and small ice cakes of the multishaft shallow-draft icebreaker ship of the project 1191 is considered. The different combinations of its draft, a list and a trim are investigated. Qualitative features of influence based on the nature of interaction of the vessel with the ice environment are described. Comparative analysis of experimental data of ice loads on the hull and a propulsion, as well as the steering complex are made. Quantitative assessments of ship based on its total ice resistance are given.

Keywords: icebreaker, propulsion and steering complex, ice condition, ice channel, CAE-system, finite element modeling.

References

1. Akihisa Konno, Akihiro Nakane, Satoshi Kanamori. Validation of numerical estimation of brash ice channel resistance with model test. Proceedings of the 22 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, 2013, Espoo, Finland. – Access mode: http://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_143.pdf
2. Anthony F. Molland., Stephen R. Turnock., Dominic A. Hudson. Ship Resistance and Propulsion: practical estimation of ship propulsive power. – New York: Cambridge University Press. 2011. – 537 p. – Access mode: [http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%2oresistance%2oand%2opropulsion%2o_%2oof.Molland%2o\(2011\).pdf](http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%2oresistance%2oand%2opropulsion%2o_%2oof.Molland%2o(2011).pdf)
3. Junji Sawamura, Ryouhei Kikuzawa, Takashi Tachibana, Masaya Kunigita. Numerical investigation of the ice Force Distribution around the Ship Hull in level Ice. Proceedings of the 21 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. July 10-14, 2011, Montreal, Canada. – Access mode: <http://www.poac.com/PapersOnline.html>
4. 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](https://doi.org/10.26583/sv.10.1.07) – Access mode: <http://sv-journal.org/2018-1/07/?lang=en>
5. E.M. Appolonov, K.E. Sazonov, A.A. Dobrodeev, N.Yu. Klementieva, M.A. Kudrin, E.A. Maslich, V.O. Petinov, V.M. Shaposhnikov. Studies to develop technologies for making a wider channel in ice. Proceedings of the 22 International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 9-13, 2013, Espoo, Finland. – Access mode: http://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_041.pdf

6. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya xodkost` sudov. 2 izdanie, ispravlennoe. – SPb.: Sudostroenie, 2014. – 504 s., il. [in Russian]
7. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ry`vlin A.Ya. Soprotivlenie l`da dvizheniyu sudna. – L.: Sudostroenie, 1968. – 238 s. [in Russian]
8. Tronin V.A. Povy`shenie bezopasnosti i e`ffektivnosti ledovogo plavaniya sudov na vnutrennix vodny`x putyax: dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora texnicheskix nauk: special`nost` 05.22.16 – Sudovozhdenie / Gor`kij, 1990. – 414 s. [in Russian]
9. E`kspluatacionno-texnicheskie ispy`taniya transportny`x i ledokol`ny`x sudov v ledovy`x usloviyax s razrabotkoj predlozhenij, obespechivayushhix ix kruglogodovuyu e`kspluatatsiyu. Otchyot o nauchno-issledovatel`skoj rabote po teme N`XV-3.2/794147. Nauchny`e ruk. – Tronin V.A., Bogdanov B.V. - Gor`kij.: GIIVT, 1981. – 262 s. [in Russian]
10. Lobanov V.A. Chislennaya ocenka ledovy`x kachestv sudna. Upravlyaemost`. Vestnik nauchno-texnicheskogo razvitiya, N`8, 2012. E`lektronny`j zhurnal, N` gos. reg. 0421200120, ISSN 2070-6847. – Access mode: <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=619> [in Russian]
11. Lobanov V.A. Razrabotka s primeneniem CAE-sistem normativny`x dokumentov po bezopasnosti ledovogo plavaniya sudna //Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2013 N`4 (17) [E`lektronny`j resurs]. – M. 2013. – s. 1-14. – Access mode: <http://naukovedenie.ru/PDF/71tvn413.pdf>, svobodny`j – Zagl. s e`krana. [in Russian]
12. Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA. – Access mode: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>