

МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЙСОВ СУДОВ В АРКТИКЕ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ

О. В. Таровик

Крыловский государственный научный центр, ООО «Бюро Гиперборей»
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2021 г.

Выполнен анализ различных подходов к моделированию движения судов во льдах и определению длительности рейсов. Рассмотрены полуэмпирические модели расчета ледового сопротивления, численные методы моделирования взаимодействия судов со льдом, а также статистические модели, базирующиеся на регрессионных соотношениях или методах искусственного интеллекта. Проанализирована применимость каждого из подходов к задаче прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике. Предложена концепция создания универсальной расчетной модели, которая могла бы использоваться в составе современных программных комплексов интеллектуальной поддержки арктического судоходства.

Ключевые слова: ледовое сопротивление, модель движения судов, численные методы, арктическое судоходство, ледовые условия.

Введение

Модели прогнозирования параметров рейсов судов во льдах являются одним из ключевых элементов любой системы поддержки принятия решений в арктическом судоходстве. Они используются как при стратегическом анализе, так и при оперативно-тактическом планировании [1] работы флота. От точности оценки длительности рейсов, расходов топлива и необходимых объемов ледокольного сопровождения судна напрямую зависят результаты такого планирования. Вместе с тем в настоящее время не существует единого подхода к созданию моделей движения судов во льдах, что обусловлено исключительной сложностью ледяного покрова с точки зрения его влияния на судоходство.

Все существующие подходы, которые потенциально могли бы использоваться для определения параметров рейсов судов в ледовых условиях, можно укрупненно разделить на три группы:

- подход на основе полуэмпирических формул, подразумевающий использование аналитических со-

отношений, которые базируются на физических моделях взаимодействия судна со льдом и содержат эмпирические коэффициенты;

- подход на основе численных моделей, заключающийся в численном интегрировании уравнений, описывающих разрушение ледяного покрова и движение судна в пространстве;
- статистический подход, базирующийся на обобщении результатов натурных наблюдений над движением судов в реальных льдах и получении соответствующих регрессионных зависимостей или обучении нейронных сетей.

Для каждого подхода характерны свои упрощающие допущения как в части описания процессов взаимодействия судна со льдом, так и в области моделирования ледяного покрова как среды судоходства. В настоящей работе выполнен анализ существующих решений и предложены пути практической реализации комплексной расчетной модели, которая могла бы применяться в современных системах интеллектуальной поддержки арктического судоходства.

© Таровик О. В., 2021

Полуэмпирические методы

Активное развитие полуэмпирических методов для определения ледового сопротивления началось в 1950-х годах в связи с появлением первых ледовых опытовых бассейнов. Такие методы основываются на аналитическом описании процессов разрушения ледяного покрова при его взаимодействии с корпусом судна. Для них характерно выделение различных составляющих ледового сопротивления, в качестве которых выступают силы, возникающие при ломке ледяной пластины изгибом, развороте льдин вдоль корпуса судна, притапливании обломков льда, трении льда о корпус, раздвигании льдин, взаимодействии корпуса с ледяной кашей и др. В рамках каждого метода создается свое аналитическое решение, которое затем соотносится с данными модельных или натурных испытаний. В результате определяются эмпирические коэффициенты, которые нивелируют допущения и упрощения, принятые в аналитической модели. Границы применения полуэмпирических методов обусловлены наличием эмпирических коэффициентов, которые связаны с принятыми допущениями о форме корпуса судна, толщинах льда и скоростях хода.

Наиболее многочисленная группа полуэмпирических методов описывает движение судна в сплошном ровном неподвижном (т. е. припайном) льду с малой скоростью. В настоящее время опубликовано несколько сотен соответствующих работ. Наиболее распространенными в отечественной практике является метод Б. П. Ионова [2], а в зарубежной — Г. Линдквиста [3] и К. Риски [4]. Приведем в качестве примера общую формулу для оценки сопротивления судна R_i в сплошном ровном льду толщиной h_i при скорости хода v согласно методике Линдквиста:

$$R_i = (R_c + R_b) \left(1 + 1,4 \frac{v}{\sqrt{gh_i}} \right) + R_s \left(1 + 9,4 \frac{v}{\sqrt{gL}} \right), \quad (1)$$

где R_c — сопротивление от разрушения льда форштевнем; R_b — сопротивление от изгибного разрушения льда бортами; R_s — сопротивление от притапливания льда; L — длина судна по ватерлинии; g — ускорение свободного падения.

Составляющие R_c , R_b , R_s зависят от геометрии корпуса судна, свойств льда и его толщины.

Высокий интерес к сплошному ровному льду обусловлен главным образом тем, что на его основе производится регламентация одной из основных проектных характеристик судна ледового плавания — предельной ледопроеходимости. Эта величина является общепризнанным интегральным показателем ледовых качеств судна, который подтверждается в ходе сдаточных испытаний.

Однако с точки зрения практической навигации судов во льдах движение в неподвижном припайном льду с малыми скоростями хода является редким режимом работы. В основном суда движутся в дрейфующем льду различных размеров и в ле-

довых каналах, образуемых в припае на подходах к портам и в прибрежных районах. При этом число разработанных полуэмпирических методов для расчета сопротивления на таких режимах движения в десятки раз меньше, чем для случая сплошного ровного льда. Например, для оценки сопротивления в мелкобитых льдах в основном используется формула А. Я. Рывлина [5] и ряд ее модификаций, в то время как альтернативных отечественных и зарубежных методов насчитывается не более десяти. Расчет сопротивления в ледовом канале, заполненном тертым льдом, может быть выполнен с использованием буквально несколько формул, одна из которых [6] разработана с целью регламентации мощности судов ледового плавания. Подобным образом обстоят дела и с сопротивлением судов в торосах. В настоящее время насчитывается не более пяти полуэмпирических методов, среди которых наиболее часто используется подход, описанный в [7].

Примеров использования полуэмпирических методов для расчетов параметров рейсов судов в ледовых условиях немного. В существующих работах моделируемая трасса описывается набором условных участков [8], таких как ровный лед заданной толщины, открытая вода, гряды торосов, характеризующие частотой появления (или расстоянием между торосами) и геометрией подводной и надводной частей. Пример генерации геометрии профиля льда на участке маршрута при наличии торосов приведен на рис. 1 по данным [9]. Параметры движения вычисляются путем расчета сопротивления на каждом участке и численного интегрирования одномерного уравнения движения. Тяга движительного комплекса определяется, как правило, упрощенным способом, без применения итерационных процедур [10], позволяющих определить режим работы винтов при заданных скорости и сопротивлении. В большинстве моделей используется аппроксимация зависимости тяги на гяке от скорости хода, которая была изначально предложена в [11] и получила широкое распространение в иностранной практике [4]. Пример получаемой динамики скоростей хода показан на рис. 2, где отображена работа судна набегами при преодолении тороса (отход назад при отрицательных значениях скоростей хода и разностей дистанций), разгон по каналу с мелкобитым льдом, удар о торос, продвижение дальше и т. п. Длительность прохождения ледового участка с заданными характеристиками определяется в ходе стохастических экспериментов, в которых параметры льда генерируются случайным образом в соответствии с заданным распределением.

Описанный подход может использоваться для технико-экономической оптимизации обводов и размерений судов, работающих во льдах, поскольку полуэмпирические методы позволяют учитывать основные особенности формы корпуса. Однако применение такого подхода для прогнозирования дли-

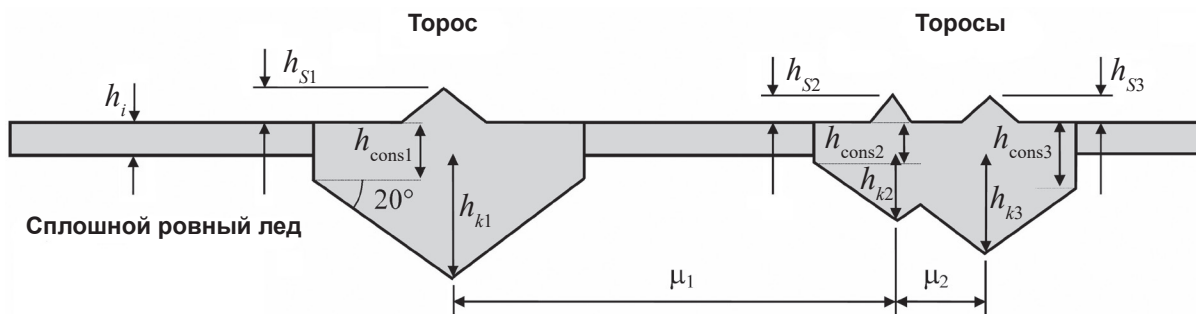


Рис. 1. Пример генерации профиля льда с учетом торосов на участке ледового маршрута [9]: h_i – толщина условного ровного льда, h_{cons} – толщина консолидированного слоя тороса, h_k – глубина киля тороса, h_s – высота паруса тороса
 Fig. 1 An example of ice profile generation considering hummocks on ice route section [9]: h_i – thickness of level ice, h_{cons} – thickness of hummock consolidated layer, h_k – depth of hummock keel, h_s – height of hummock sail

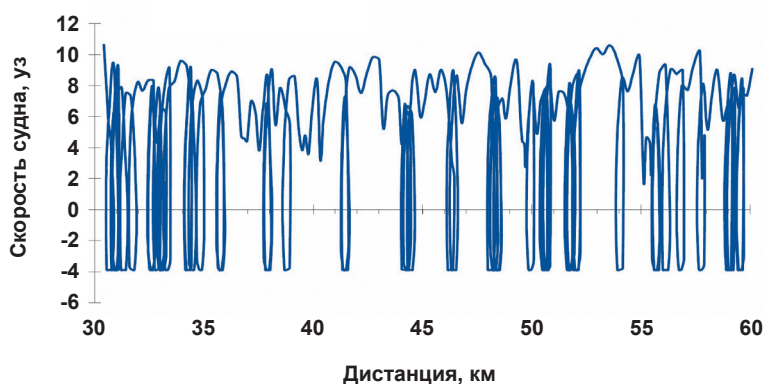


Рис. 2. Пример изменения скорости судна на ледовом участке со случайно сгенерированными условиями [9]
 Fig. 2 An example of ship speed dynamics on the route segment with randomly generated ice [9]

тельности реальных арктических рейсов затруднено по следующим причинам.

Во-первых, используемые данные о геометрии ледового поля (характеристики торосов, толщины льда, размеры льдин и т. д.) не соответствуют сложившейся практике гидрометеорологического обеспечения арктического судоходства. Для целей практической навигации доступны, как правило, ледовые карты в формате Sigrid-3 [12], в которых определены только возрастной состав, форма и сплоченность льда. Остальные данные могут быть получены в ходе специальных измерений.

Во-вторых, каждая полуэмпирическая методика характеризуется определенными ограничениями, которые относятся к геометрии судовых обводов, сценариям взаимодействия со льдом и свойствам ледяного покрова. Однако основная проблема заключается даже не в этих ограничениях, а в том, что для судов, которые формально соответствуют требованиям какой-либо методики, можно получить оценки с неприемлемо высокой погрешностью. Причем надежных способов оценки точности прогнозирования в каждом конкретном случае в настоящее

время не существует. Например, в [13] и [14] показано, что расчетное ледовое сопротивление традиционных судов в сплошном ровном льду может отличаться от натурального в два раза даже при использовании наиболее распространенных и признанных формул. Для современных судов большого водоизмещения погрешности только возрастают. Таким образом, полуэмпирические модели расчета ледового сопротивления не универсальны и могут приводить к существенным ошибкам при формальном выполнении всех ограничений.

Вместе с тем полуэмпирические методики обладают рядом очень важных преимуществ. Для них характерна физичность, которая позволяет, по крайней мере на качественном уровне, учитывать особенности формы корпуса судна, а также особенности движения на различных скоростях во льдах различной толщины. Кроме того, их отличает относительно низкая вычислительная сложность, что особенно важно при создании моделей, предназначенных для использования в алгоритмах оптимальной ледовой маршрутизации [15].

Численные модели

Численные модели взаимодействия морских объектов с ледяным полем наиболее широко используются для офшорных сооружений, отличающихся нетипичными формами корпуса (наклонные стенки, конусы, цилиндры, многоопорные основания) и нестандартными сценариями взаимодействия со льдом (торосистые нагромождения, взаимодействие льда с грунтом), которые сложно описать аналитически. С помощью таких моделей можно анализировать не только ледовое сопротивление (или глобальную ледовую нагрузку), но и локальные ледовые давления [16], а в случае самоходных судов могут также рас-

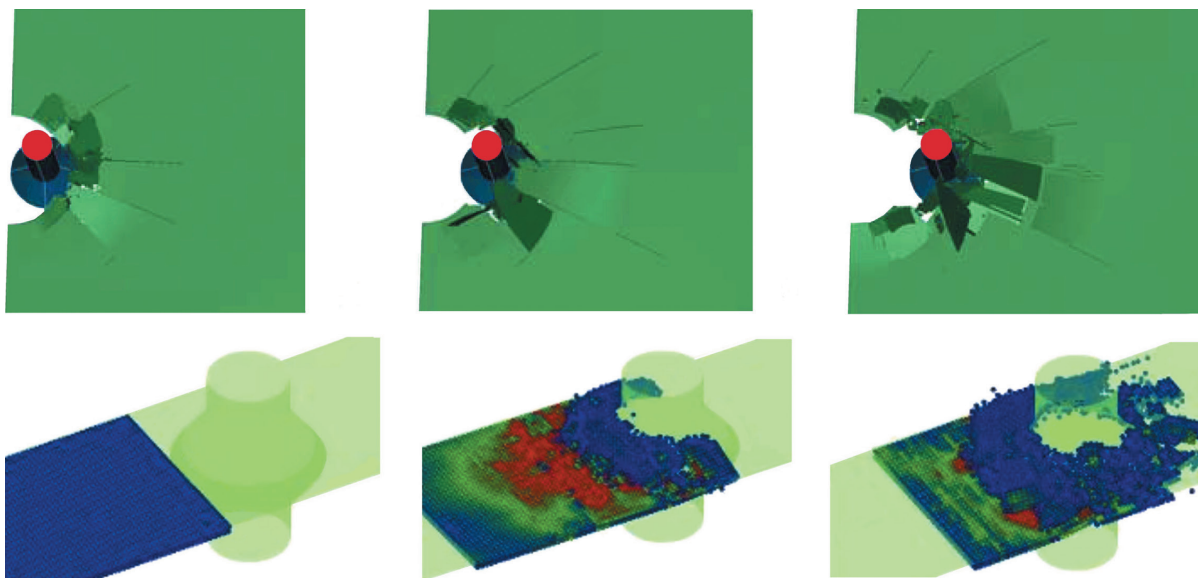


Рис. 3. Примеры решения задачи о наползании ледового поля на коническую конструкцию при помощи FEM (сверху) и DEM (снизу) подходов по данным работ [18] и [19] соответственно
 Fig. 3. Examples of solving the problem of an ice field creeping onto a conical structure using the FEM (upper figure) and DEM (lower figure) approaches according to the data of [18] and [19], respectively

смагиваться вопросы управляемости во льдах. Для решения численных задач используются как коммерческие программные продукты (LS-Dyna, Ansys, Plaxis, Abaqus), так и специально созданные модели.

Среди численных методов можно выделить две принципиальные группы, в рамках которых лед описывается либо как непрерывная среда (метод конечных элементов — finite element method — FEM), либо как набор дискретных элементов (discrete element method — DEM). Первый подход заключается в разбивке непрерывной среды на сеточную область, каждый элемент которой связан с соседними с помощью уравнений, основанных на принципах сохранения масс, моментов и энергии. Основная сложность применения этого подхода к задаче взаимодействия конструкций со льдом состоит в описании разрушения льда, которое может происходить за счет изгиба, смятия или среза. Для этого могут применяться, например, модели, в которых элементы сетки удаляются из расчета при превышении заданных напряжений или деформаций, либо модели дискретных трещин (модели когезионной зоны — cohesive element model — CEM). В методах из группы DEM взаимодействие дискретных элементов описывается с помощью различных реологических моделей (упругие и демпфирующие силы) и коэффициентов трения, а также, при необходимости, — с учетом сил тяжести, плавучести, ветрового воздействия, течения, и др. В случае представления сплошного льда набором дискретных элементов вводятся дополнительные параметры, описывающие связи между частицами, а также условия разрыва этих связей, соответствующие принятым критериям разрушения.

Несмотря на то что активное развитие численных моделей взаимодействия сооружений со льдом началось во второй половине 2000-х годов, до сих пор в этой области отсутствует некий общепризнанный подход. Более того, даже для сооружений относительно простой конусообразной формы различные численные методы при различной геометрии сеточной области приводят к результатам, различающимся как по качественной картине изменения нагрузки во времени, так и по количественным показателям [17]. Это обусловлено высокой сложностью процессов взаимодействия сооружений со льдом и различными формами разрушения льда, зависящими от комбинации множества параметров, относящихся как к форме сооружения, так и к параметрам самого льда. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты решения задачи о наползании сплошного ледового поля на коническую конструкцию с использованием FEM [18] и DEM [19] подходов. Видно, что картина разрушения льда, получаемая с использованием различных методов, существенно отличается.

Вследствие этих особенностей практически методы численной оценки ледового сопротивления водоизмещающих судов получили развитие в несколько ином направлении.

В [20] описана двумерная численная модель движения судна с тремя степенями свободы в сплошном ровном льду, которая в части выделения составляющих ледового сопротивления опирается на метод Линдквиста [3], но предполагает получение значений сопротивления путем численного интегрирования уравнений движения судна и разрушения ледяного покрова. Для моделирования разрушения



Рис. 4. Схема ломки льда и дискретизация ватерлинии судна и ледового поля [20]
 Fig. 4. Ice breaking pattern and discretization of the ship waterline and ice field [20]

льда используется эмпирическая формула, связывающая радиус r выламываемого корпусом сегмента льда со скоростью v_n^{rel} по нормали к корпусу в точке контакта и со свойствами льда:

$$r = C_l (1 + C_v v_n^{rel}) \left(\frac{E h_i^3}{12(1 - \mu^2) \rho_w g} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

где C_l и C_v — численные коэффициенты; E , μ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона льда; ρ_w — плотность воды.

Последний множитель в формуле (2) представляет собой характерный радиус изгиба ледового поля, определяемый по соотношению, полученному из теории изгиба пластин. В модели также учитываются локальные давления в точках контакта корпуса со льдом. Результирующая картина ломки ледяного покрова (рис. 4) принципиально соответствует картине, наблюдаемой в реальности [5]. Выламываемые сектора льда имеют одинаковую круговую форму, но различный диаметр, зависящий от толщины льда, скорости и формы корпуса судна в точках контакта, а также от геометрии кромки ледового поля. Результирующая сила ледового сопротивления имеет характерный пульсирующий характер (рис. 5), а ее средние значения хорошо соответствуют данным натурных наблюдений, что является прямым следствием использования эмпирических данных при построении численной модели.

Схожий подход применен и в ряде других работ, некоторые из которых развивают и дополняют описанную концепцию, а некоторые предлагают иную расчетную схему разрушения ледяного покрова. Например, в [21] описание процесса выламывания сегмента ледового поля производится на основе модели полубесконечной пластины на упругом основании, для которой имеется аналитическое решение, позволяющее определять прогиб и напряжения. В [22] введена новая геометрия выламываемого сегмента льда, которая более точно соответствует натурной картине (эллиптическая форма кромки, наличие диагональной трещины в ледовом сегмен-

те). В [23] предложена модель, в которой сопротивление от ломки льда и проворачивания обломков определяется на основе теории потенциального течения и FEM, а сопротивление от притапливания льдин — на основе метода Линдквиста [3]. Если обратиться к отечественным разработкам, схожая концепция интеграции полуэмпирических моделей разрушения ледового поля и идей численного интегрирования была предложена Ю. Н. Алексеевым и К. Е. Сазоновым еще в 1980-х годах [24]. Попытка обобщения имеющего множества альтернативных подходов и концепция технологии конфигурирования численной модели под конкретную задачу представлены в [25].

Отмеченные работы относятся к случаю движения судна в сплошном ровном льду, однако существуют и немногочисленные исследования, в которых описывается движение судов в битых льдах. Такие модели строятся, как правило, на основе DEM [26].

Резюмируя возможности численных методов в части их применения для прогнозирования параметров рейсов судов ледового плавания на арктических линиях, можно отметить, что подходы на основе FEM и DEM не могут напрямую использоваться при моделировании рейсов судов в Арктике, поскольку характеризуются значительной вычислительной сложностью. Модели этого класса являются в основном исследовательскими, применяются для нетипичных случаев и требуют особого внимания при анализе результатов.

Специализированные численные модели, предназначенные для водоизмещающих судов, более перспективны в части использования для расчета сопротивления и ледопроеходимости судов с нетипичными обводами или на нетипичных режимах движения. Например, в [27] показана возможность использования модели [20] для анализа сопротивления судов двойного действия при движении кормой вперед. То есть на основе численных методов могут быть определены значения расчетного ледового сопротивления в случаях, выходящих за пределы возможностей полуэмпирических моделей.

Таким образом, сфера применения численных методов для решения задач прогнозирования параме-

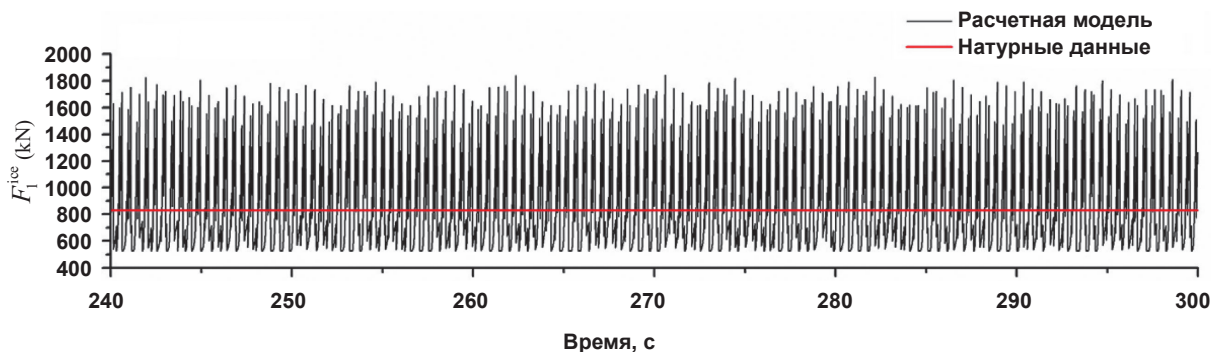


Рис. 5. Изменение ледового сопротивления F_1^{ice} во времени и его сопоставление с усредненным натурным значением [20]
 Fig. 5. Change in ice resistance F_1^{ice} over time and its comparison with the averaged field value [20]

тров рейсов судов в ледовых условиях представляется достаточно ограниченной и сводится к получению уточненных оценок параметров движения для отдельных нестандартных случаев, когда невозможно использовать методы других типов.

Статистический подход

Методы двух описанных выше групп применяются в условиях идеализированного льда, в основном сплошного ровного. Физические характеристики такого льда известны, что позволяет использовать сценарий движения судна в сплошном ровном льду в качестве регламентационного при проектировании судна и интегральной оценке его ледовых качеств.

Однако реальный морской лед — гораздо более сложная для описания среда, которая характеризуется множеством параметров, влияющих на сопротивление и скорость судна. Для каждой возрастной градации льда (обычно в однородной ледовой зоне их выделяют три) различают собственно возраст, сплоченность и форму (горизонтальный размер) льда. Дополнительно ледовые условия характеризуются торосистостью, заснеженностью, разрушенностью, интенсивностью сжатий, а также характеристиками разрывов сплошности ледяного покрова (разводья, локальные полыньи и т. п.). Большинство этих параметров не подлежат инструментальному измерению и определяются гидрологом на глаз, а используемая для этого балльная система классификации подразумевает достаточно широкие пределы варьирования оцениваемых параметров [12]. Например, возрастная градация однолетнего льда средней толщины объединяет значения от 70 до 120 см, тогда как эта вариация может оказать принципиальное влияние на скорость судна. Кроме того, движение судов в дрейфующих льдах имеет избирательный характер, при котором судоводитель обходит тяжелые льды и двигается по наиболее легким, что приводит к необходимости различать ледовые условия в регионе движения и ледовые условия непосредственно на пути плавания [28]. Все

это затрудняет создание физически обоснованных моделей движения судов во льдах.

В этих условиях для определения параметров движения судов и караванов в Арктике еще в конце 1960-х годов отечественные специалисты предложили использовать эмпирико-статистические модели, полученные в ходе регрессионного анализа данных систематических наблюдений на борту судов [29]. Общий вид эмпирических зависимостей скорости судна от толщины льда при движении во льдах различной торосистости, разрушенности, сплоченности, а также в различные сезоны года приведен на рис. 6. Характерная зависимость, которая используется для прогнозирования максимально достижимой скорости судна v_{max} в сплошном ровном льду толщиной h_i , имеет вид [30]

$$v_{\text{max}} = v_0 - \left[Fv_0 \frac{h_i}{h_i + Kh_{\text{пр}}} + D \frac{h_i (h_i + Bh_{\text{пр}})}{e^{2h_i} + e^{-2h_i}} \right], \quad (3)$$

где v_0 — максимально достижимая скорость на чистой воде; $h_{\text{пр}}$ — предельная ледопроездимость судна на скорости 1,5—2,0 уз; F, K, D, B — эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого судна и каждого сезона года.

Развитие эмпирико-статистической модели, происходившее в основном в 1970—1980-х годах, позволило учесть возрастную состав льда [31], разработать способ моделирования торосистости [32], получить эмпирические оценки отличия ледовых условий непосредственно на пути плавания судна от ледовых условий в регионе [28], учесть горизонтальные размеры льдин [33], адаптировать модель для применения к крупнотоннажным судам ледового плавания [30], учесть влияние разрывов сплошности ледяного покрова [34].

В эмпирико-статистической модели выделены два возможных режима движения судна: с максимальной возможной (ледовой технической) скоростью и с эксплуатационной скоростью. Последняя определяется как некая доля от первой и представляет собой

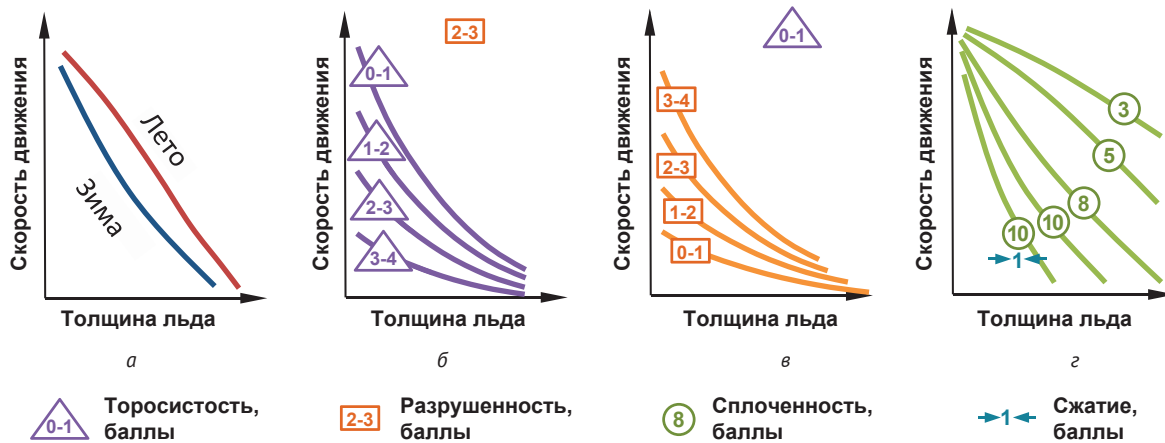


Рис. 6. Общий вид эмпирических зависимостей [29] скорости судна от толщины льда при движении: а – в припайных льдах в различные сезоны, б – в припайных льдах при различной торосистости, в – в припайных льдах при различной разрушенности, з – в битых льдах при различной сплоченности и сжатии 1 балл
 Fig. 6. General view of empirical dependences [29] of ship speed on ice thickness during operation: а – in fast ice in different seasons, б – in fast ice with different degree of hummocking, в – in fast ice with different degree of melting, з – in broken ice with different concentration and compression of 1 point

статистически обусловленную скорость, которой соответствуют усредненные эксплуатационные режимы работы энергетической установки (ЭУ). Однако текущие значения мощности, подаваемой на гребные валы на каждом участке маршрута, в эмпирической модели в явном виде не учитываются, что вносит дополнительную неопределенность в результаты расчетов. Для повышения точности такой модели необходима ее настройка на конкретный тип судна с использованием данных экспедиционных журналов и результатов попутных наблюдений. В качестве входных параметров модели выступают основные характеристики судна и полный перечень параметров льда [35].

Во времена СССР зарубежные аналоги эмпирико-статистической модели отсутствовали [36]. Однако в связи с внедрением спутниковых технологий, а также вследствие активизации транзитного судоходства на Северном морском пути в конце 2000-х годов в мире существенно возрос интерес к применению методов статистического анализа рейсов судов во льдах. В настоящее время принципы эмпирико-статистического подхода развиваются на новом технологическом уровне и базируются на использовании технологий больших данных — big data [37] и машинного обучения [38]. Эти технологии применяются как к параметрам движения судов, так и к данным о ледовой обстановке, т. е. позволяют установить статистическую связь между ними. Принципиальное отличие этого подхода от регрессионно-эмпирического заключается в отсутствии явных зависимостей, связывающих характеристики судна, ледовые условия и результирующие параметры движения. То есть вся логика расчетной модели скрыта в «черном ящике» используемого алгоритма машинного обучения. Пример такой вероятностной

модели с указанием параметров ледовых условий, влияющих на скорость хода судна, приведен на рис. 7 по данным [39].

Другой особенностью современного подхода является явный учет в модели таких факторов, как текущая мощность ЭУ и упор гребного винта, а также построение модели на основе инструментальных наблюдений за параметрами ледовых условий [40]. Реализация такого подхода стала возможна благодаря развитию методов регистрации режимов работы судовой ЭУ, а также бортовых и спутниковых средств измерения толщин льда. Данные о режиме работы ЭУ и ледовой обстановке служат входными параметрами алгоритмов машинного обучения, что позволяет построить искомую модель для прогнозирования параметров движения судна. С использованием описанного подхода могут решаться также и более локальные задачи, такие как, например, оценка вероятности застревания судна во льдах [41].

Суммируя основные особенности подхода, названного здесь статистическим, можно отметить, что основным препятствием при его практической реализации является сложность получения большого массива натуральных данных, который будет достаточен для обеспечения статистической достоверности оценок параметров движения в ледовых условиях всех типов с учетом всех возможных сочетаний характеризующих их параметров. Помимо этого существуют также определенные организационные и технические трудности регистрации режима работы ЭУ и гребных винтов коммерческих судов на постоянной основе. Такие работы носят в основном исследовательский характер. Если же производить обучение нейронной сети без использования информации с борта судна, т. е. только на основе ледо-

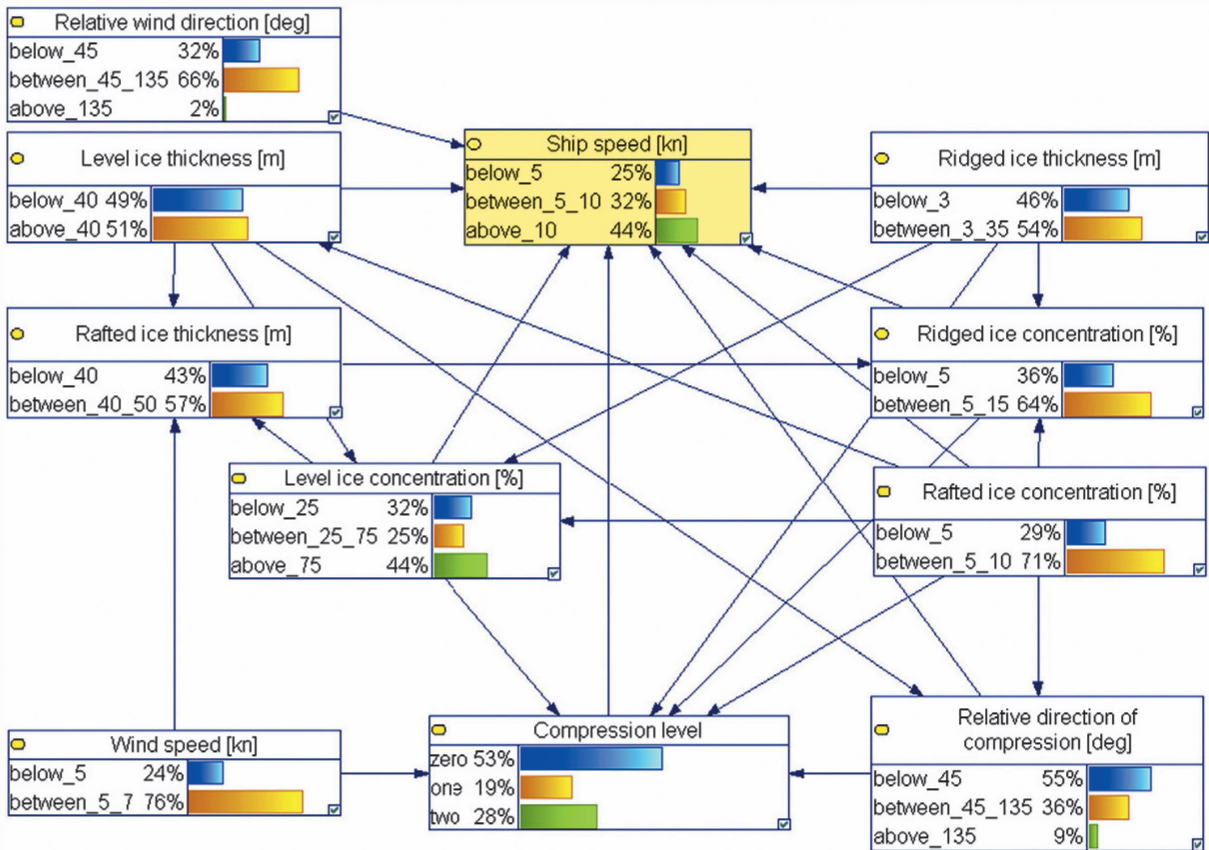


Рис. 7. Схема байесовской сети в модели для прогнозирования скорости движения судна во льдах на основе технологии машинного обучения с учетом комплекса влияющих факторов [39]

Fig. 7. Bayesian network diagram in a model for predicting the vessel speed in ice based on machine learning technology and considering a set of influencing factors [39]

вых карт и фактических треков судов, то возникает проблема недостаточности данных [38]. Например, в случае снижения скорости судна невозможно установить, произошло это вследствие ледовой обстановки или в результате снижения мощности по субъективным причинам.

Дополнительным ограничением является то, что большинство современных исследований в этой сфере выполнено применительно к региону Балтийского моря, в котором наблюдается только однолетний лед со средними толщинами порядка 30—50 см. Построение аналогичных моделей для условий Арктики затруднено широкой номенклатурой и большими диапазонами варьирования ледовых параметров, а также разнообразием характеристик судов. Существующие отечественные разработки в этой области, которые применимы для Арктики, носят закрытый характер [42].

Вместе с тем принципиальным достоинством статистического подхода является возможность неявного учета всего комплекса факторов, влияющих на параметры движения судов во льдах, вплоть до чисто субъективных аспектов, таких, например, как стиль управления судном конкретным капитаном. В некоторых случаях только на основе статистического

подхода могут быть получены зависимости для учета влияния таких ледовых образований, которые являются сложными с точки зрения построения расчетных моделей (разрушенный лед, разрывы сплошности).

Концепция создания прикладной модели

Выполненный обзор альтернативных подходов позволяет предложить следующую концепцию практической реализации модели движения, которая могла бы использоваться в задачах планирования работы флота в Арктике.

Представляется, что перспективная модель должна сочетать в себе элементы и возможности всех указанных направлений, но в основном базироваться на полуэмпирическом подходе и позволять в явном виде определять ледовое сопротивление. Применение полуэмпирического подхода в данном случае вызвано именно необходимостью расчета силы сопротивления, а не просто скорости хода, как это происходит в статистических моделях. Построение же модели на основе силы сопротивления обусловлено следующими причинами.

Во-первых, лед является лишь одним из природных факторов, оказывающих влияние на судно. При движении в сплоченных льдах этот фактор является

определяющим, но в других ситуациях необходимо учитывать и иные составляющие, такие как сопротивление от ограниченной глубины (большая часть Арктики мелководна), от морского волнения (арктические суда характеризуются плохой ходкостью на волнении), от ветра (некоторые типы судов имеют большую парусность и подвержены влиянию ветра), а также сопротивление на чистой воде. Степень влияния каждой из этих составляющих зависит от сезона года, типа судна и района плавания. Поэтому для получения универсальной модели необходимо учитывать все слагаемые сопротивления и ледовое сопротивление как одну из них.

Во-вторых, наличие в модели силы сопротивления позволяет моделировать работу движителей с использованием традиционных или новых [10] методов прикладной гидромеханики, а также определять требуемую мощность на гребных валах и соответственно расходы топлива. Информация о расходах топлива достаточно важна на практике, а учет режима работы движителей открывает возможности явного задания различных эксплуатационных ограничений, таких, например, как условие не превышения максимально допустимой частоты вращения гребных винтов.

В-третьих, модель движения, основанная на ледовом сопротивлении, может быть более подробно исследована и верифицирована на основе натурных данных с учетом всех влияющих факторов. Для этого должны выполняться наблюдения на борту судна, в ходе которых регистрируются мощность на валах, частота вращения винтов, ледовая обстановка, глубины моря и ветро-волновые условия.

В-четвертых, вычислительная сложность модели, построенной на полуэмпирических соотношениях, относительно невелика. Это позволяет использовать ее в задачах оптимальной ледовой маршрутизации судов, где для построения маршрута требуется проанализировать скорость судна во множестве расчетных точек [43].

Однако, как отмечено выше, возможности существующих полуэмпирических методов ограничены, поэтому для создания универсальной модели мы предлагаем выполнить ряд работ по их модификации, в основном по следующим направлениям:

- Обеспечение возможности масштабирования расчетного ледового сопротивления таким образом, чтобы расчетная ледопроездимость заданного судна в спецификационных условиях строго соответствовала известному натурному значению. Такой подход позволит избежать отмеченных ранее «выбросов» значений ледового сопротивления, определенного на основе полуэмпирических зависимостей. Если натурные данные о ледопроездимости судна отсутствуют, ее значение может быть определено на основе экспериментальных исследований или численных моделей.
- Создание методики учета влияния сезона и региона эксплуатации на ледовое сопротивление. Это

может быть реализовано путем моделирования значений физико-механических параметров льда в заданных регионе и сезоне на основе известных расчетных соотношений. Соответствующие оценки в настоящее время имеются только в эмпирико-статистической модели, но они не являются универсальными и физически обоснованными.

- Создание подходов для определения сопротивления в битых льдах, характеризующихся различной сплоченностью и произвольным горизонтальным размером (от мелкобитого льда до больших ледовых полей). Решение этой задачи может быть выполнено за счет интерполяции значений сопротивления, полученных для двух предельных сценариев, для которых имеются апробированные полуэмпирические методики: движение в мелкобитом льду и движение в сплошном ровном льду. За счет такого подхода может быть обеспечена гладкость изменения сопротивления в зависимости от размеров льдин.
 - Разработка алгоритмов расчета сопротивления при движении судна во льдах нескольких возрастных градаций, что является наиболее характерным режимом ледового плавания в Арктике. В настоящее время такие модели отсутствуют.
 - Учет направлений ледовых сжатий относительно курса судна. В настоящее время существуют как полуэмпирические, так и статистические модели, которые позволяют учитывать только интенсивность ледовых сжатий. В то же время судоводители неоднократно отмечали [44] важность учета не только силы сжатия, но и его направления.
 - Уточнение и дальнейшее развитие методов расчета сопротивления при ледокольном сопровождении судна. В настоящее время это одна из наименее изученных сфер, особенно применительно к ледокольной проводке крупнотоннажных судов. Тем не менее существующие разработки в этой области относятся в основном к классу именно полуэмпирических моделей [45].
- Однако на основе только полуэмпирического подхода невозможно обеспечить применимость модели для прогнозирования параметров движения судов в натуральных льдах. Для этого необходимо использовать элементы статистического подхода, что позволит решить следующие задачи:
- Моделирование торосистости и разрушенности льдов. Применение полуэмпирических подходов в этом случае оказывается практически невозможным из-за отсутствия данных о геометрии торосистых образований и характере таяния льда. В эмпирико-статистической модели учет торосов и разрушенности производится в виде надбавок к толщине льда [32]. Однако эти оценки получены для ледоколов и нуждаются в уточнении в ходе натурных наблюдений на борту современных транспортных судов.
 - Создание вычислительного алгоритма, позволяющего моделировать отличия ледовых условий

на пути движения судна от ледовых условий региона. Соответствующая статистика также может быть получена только на основе натуральных данных [28].

Помимо этого достаточно важен вопрос, каким образом моделировать динамику движения расчетного судна по маршруту в изменяющихся льдах. Существующие полуэмпирические подходы подразумевают решение одномерного дифференциального уравнения движения [8; 9; 45] и детализацию ледовых условий до отдельных льдин с достаточно подробным описанием их геометрии. Очевидно, что такой подход не вполне соответствует сложившемуся формату представления данных о ледовых условиях Арктики, в рамках которого выделяются крупные области с условно-постоянными ледовыми параметрами. Поэтому представляется оправданным в этом случае исключить из рассмотрения динамические эффекты и моделировать только установившийся режим движения судна. В рамках такой квазистационарной постановки средняя суммарная сила сопротивления судна приравнивается к тяге движительного комплекса [15], а соответствующая этому условию скорость является максимально достижимой скоростью хода.

Задача моделирования движения судов во льдах характеризуется наличием множества источников неопределенности, основные из которых связаны с геометрическими характеристиками льда (сплошностью, толщиной, торосами и т. п.) и его физико-механическими свойствами (пределом изгибной прочности, модулем упругости и др.). Для учета влияния этих факторов на показатели движения судна создаваемая модель должна поддерживать возможность получения не только детерминированных значений скоростей хода и расходов топлива, но также и их вероятностных оценок. Это может достигаться за счет варьирования ледовых параметров в интервалах, определяемых, например, форматом Sigrid-3, а также путем варьирования множества внутренних параметров самой модели.

Последний аспект, который следует отметить, — это моделирование режима движения судов. Известно, что при движении во льдах суда не работают все время на пределе возможностей пропульсивного комплекса, однако при необходимости могут кратковременно форсировать его. Для учета этого обстоятельства в эмпирико-статистическую модель были введены ледовая техническая и эксплуатационная скорости хода. Однако при построении расчетной модели на основе сил сопротивления необходим иной подход. Моделирование режима работы судна можно производить за счет регулирования уровня мощности ЭУ, для чего могут использоваться два параметра:

- эксплуатационная мощность на валах P_{ex} , которая определяет эксплуатационную скорость движения по чистой воде;
- пороговая скорость движения во льдах v_{ice} .



Рис. 8. Задание режима движения судна на основе эксплуатационной мощности на валах P_{ex} и пороговой скорости движения во льдах v_{ice}

Fig. 8. Setting the vessel movement mode based on the operational shaft power P_{ex} and the threshold speed v_{ice} of movement in ice

Общую логику изменения мощности на валах при изменении условной эквивалентной толщины льда можно проиллюстрировать рис. 8.

При увеличении толщины льда судно движется с эксплуатационной мощностью до тех пор, пока скорость хода не снизится до пороговой. После этого происходит плавное повышение мощности ЭУ, необходимое для удержания пороговой скорости при увеличении толщины льда. Затем судно выходит на полную мощность, и при дальнейшем увеличении толщины льда скорость хода снизится за счет увеличения ледового сопротивления. Режимы движения судна кормой вперед могут моделироваться принципиально так же.

Заключение

Создание расчетной модели движения судов во льдах невозможно без получения натуральных данных об эксплуатации судов в Арктике, которые являются одновременно и основной для разработки, и материалом для верификации. Главным источником таких данных традиционно являются средства спутникового мониторинга и дистанционного зондирования. Однако для повышения точности расчетной модели этого недостаточно, поскольку фактическая ледовая

Кораблестроение для Арктики

обстановка на пути движения судна может значительно отличаться от полученной на основе спутниковых снимков. Кроме того, могут существенно варьироваться и режимы работы ЭУ, что также должно учитываться. Поэтому для повышения точности модели необходимо иметь возможность диагностики параметров движения судна и ледовой обстановки с использованием специальных бортовых средств.

Другим важным аспектом практической реализации модели движения является ее тесная увязка с форматом, полнотой и особенностями описания параметров ледовых условий, используемых в качестве входных данных. Практический опыт свидетельствует о том, что одни и те же спутниковые данные, как правило, по-разному интерпретируются экспертами из различных национальных школ и по-разному представляются на результирующих ледовых картах. Это приводит к тому, что в ходе отладки расчетная модель будет неизбежно «настроена» под данные определенного типа. Таким образом, вопрос создания достоверной модели прогнозирования параметров движения судов в Арктике очень тесно связан с вопросами мониторинга ледовой обстановки, что требует согласованной работы по этим двум направлениям.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Разработка технологии тактического и оперативного планирования и управления работой ледоколов и судов ледового плавания в условиях круглогодичной навигации по трассам Северного морского пути» (проект № 17-79-20162-П).

Литература/References

1. Тимофеев О. Я., Таровик О. В., Топаж А. Г. и др. Концепция централизованной информационной системы для планирования работы флота в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 129—143. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-129-143.
Timofeev O. Ya., Tarovik O. V., Topazh A. G., Mironov E. U., Frolov S. V., Buyanov A. S., Gorbachev M. A., Bengert A. A. The concept of an integrated information system for planning of fleet operation in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 1 (33), pp. 129—143. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-129-143. (In Russian).
2. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.
Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ice performance of ships. St. Petersburg, Sudostroyeniye, 2001, 512 p. (In Russian).
3. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. *Proceedings of POAC-1989*, 1989, pp. 722—735.
4. Riska K., Wilhelmson M., Englund K., Leiviska T. Performance of merchant vessels in ice in the Baltic. *Research Report No 52*; Helsinki Univ. of Technology. Espoo, 1997.
5. Каштелян В. И., Поздняк И. И., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
Kashatelyan V. I., Pozdnyak I. I., Ryvlin A. Ya. Ice resistance to ship movement. Leningrad, Sudostroyeniye, 1968, 238 p. (In Russian).
6. Riska K. The background of the powering requirements in the Finnish-Swedish ice class rules. *Maritime Research Seminar'99, VVT Symposium 199*. 2000, pp. 91—106.
7. Mellor M. Ship Resistance in Thick Brash Ice. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, no. 3, pp. 305—321.
8. Valkonen J., Riska K. Assessment of the Feasibility of the Arctic Sea Transportation by using Ship Ice transit Simulation. *Proceedings of OMAE-2014*, 2014, Paper no. 24188.
9. Riska K., Patey M., Kishi S., Kamesaki K. Influence of ice conditions on ship transit times in ice. *Proceedings of POAC-2001*, 2001, p. 17.
10. Каневский Г. И., Клубничкин А. М., Сазонов К. Е. Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2019. — 160 с.
Kanevskij G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E. Forecasting of propulsion performance of multi-shaft ships. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2019, 160 p. (In Russian).
11. Рывлин А. Я., Хейсин Д. Е. Испытания судов во льдах. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
Ryvlin A. Ya., Hejsin D. E. Ice trials of ships. Leningrad, Sudostroyeniye, 1980, 208 p. (In Russian).
12. Sigrid-3: A vector archive format for sea ice charts. *JCOMM Technical Report No. 23*. WMO/TD-No. 1214. 24 p.
13. Erceg S., Ehlers S. Semi-empirical level ice resistance prediction methods. *Ship Technology Research*, 2017, 64 (1), pp. 1—14. DOI: 10.1080/09377255.2016.1277839.
14. Hu J., Zhou L. Further study on level ice resistance and channel resistance for an icebreaking vessel. *Intern. J. of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8 (2), pp. 169—176. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.01.004.
15. Kotovirta V., Jalonon R., Axell L., Riska K., Berlund R. A system for route optimization in ice-covered waters. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, no. 55, pp. 52—62.
16. Tuhkuri J., Polojarvi A. A review of discrete element simulation of ice-structure interaction. *Philosophical Transactions of The Royal Society. A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2018, no. 376. DOI: 10.1098/rsta.2017.0335.
17. Lu W., Lubbad R., Loset S., Hoyland K. Cohesive Zone Method Based Simulations of Ice Wedge Bending: a Comparative Study of Element Erosion, CEM, DEM and XFEM. *Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice*. [S. l.], 2012, pp. 920—938.

18. Yu B., Wu W., Xu N., Yue Q., Liu S. Numerical simulation of dynamic ice force on conical structure. Proceedings of POAC-07, 2007, pp. 277—285.
19. Di S., Ji S., Yue Q., Liu S. Ice Loads on Conical Off-shore Structures Based on Discrete Element Simulation. Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice, 2012, pp. 853—863.
20. Su B., Riska K., Moan T. A numerical method for the prediction of ship performance in level ice. Cold Regions Science and Technology, 2010, no. 60, pp. 177—188. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.11.006.
21. Lubbad R., Loset S. A Numerical Model for Real-Time Simulation of Ship–Ice Interaction. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65 (2), pp. 111—127. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.09.004.
22. Li F., Kotilainen M., Goerlandt F., Kujala P. An extended ice failure model to improve the fidelity of icebreaking pattern in numerical simulation of ship performance in level ice. Ocean Engineering, 2019, no. 176, pp. 169—183. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.051.
23. Valanto P. The resistance of ships in level ice. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2001, no. 109, pp. 53—83.
24. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 273 с.
- Sazonov K. E. Theoretical foundations of ship navigation in ice. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2010, 273 p. (In Russian).
25. Li F., Goerlandt F., Kujala P. Numerical simulation of ship performance in level ice: A framework and a model. Applied Ocean Research, 2020, no. 102. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102288.
26. Huang L., Li M., Igrec B., Cardiff P., Stagonas D., Thomas G. Simulation of a ship advancing in floating ice floes. Proceedings of POAC-2019, 2019, 13 p.
27. Su B., Riska K., Moan T., Berg T. E. Full-scale and model-scale simulations of a double acting intervention vessel operating in level ice. Proceedings of 21st IAHR International Symposium on Ice. [S. l.], 2012, pp. 1058—1068.
28. Бузуев А. Я., Федяков В. Е. Изменчивость ледовых условий на пути плавания судов // Метеорология и гидрология. — 1981. — № 2. — С. 69—76.
- Buzuev A. Ya., Fedyakov V. E. Variability of ice conditions on ship way. Meteorologiya i gidrologiya, 1981, no. 2, pp. 69—76. (In Russian).
29. Гордиенко П. А., Бузуев А. Я., Сергеев Г. Н. Изучение ледяного покрова моря как среды судоходства // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1967. — № 27. — С. 93—104.
- Gordienko P. A., Buzuev A. Ya., Sergeev G. N. Study of sea ice cover as a shipping environment. Problemy Arktiki i Antarktiki, 1967, no. 27, pp. 93—104. (In Russian).
30. Brovin A. I., Klyachkin S. V., Bhat S. U. Application of an empirical-statistical model of ship motion in ice to new types of icebreakers and ships. Proceedings of OMAE-1997, 1997, vol. IV, pp. 43—49.
31. Сергеев Г. Н. Использование данных о толщинах льда для оценки проходимости ледовых трасс судами // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1978. — № 54. — С. 52—56.
- Sergeev G. N. Using data on ice thickness to assess the passability of ice routes by ships. Problemy Arktiki i Antarktiki, 1978, no. 54, pp. 52—56. (In Russian).
32. Сергеев Г. Н., Хромов Ю. Н. Торосистость и сопротивляемость льда движущемуся судну // Метеорология и гидрология. — 1980. — № 10. — С. 100—104.
- Sergeev G. N., Khromov Yu. N. Hummocking and ice resistance to vessel movement. Meteorologiya i gidrologiya, 1980, no. 10, pp. 100—104. (In Russian).
33. Бузуев А. Я., Федяков В. Е. Комплексный учет характеристик состояния ледяного покрова при разработке рекомендации для судоходства // Вопросы повышения прочности и надежности морских и портовых сооружений: Сборник научных трудов. — М.: Транспорт, 1983. — С. 89—97.
- Buzuev A. Ya., Fedyakov V. E. Comprehensive accounting of the characteristics of ice state when developing recommendations for shipping. Issues of increasing the strength and reliability of sea and port facilities. Collection of scientific papers. Moscow, Transport, 1983, pp. 89—97. (In Russian).
34. Фролов С. В. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в арктическом бассейне в летний период // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 3 (97). — С. 35—45.
- Frolov S. V. Orientation of the leads and cracks in the ice cover relatively to direction of the ship movement is the most important characteristic of ice navigation in the Arctic basin. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2013, no. 3 (97), pp. 35—45. (In Russian).
35. Третьяков В. Ю., Сарафанов М. И., Федяков В. Е., Фролов С. В. От Сабетты до Карских ворот: Методика расчета скорости движения судна в ледяном покрове как интегрального показателя ледовых условий плавания // Neftegaz.ru. — 2020. — № 8 (104). — С. 46—50.
- Tretyakov V. Yu., Sarafanov M. I., Fedyakov V. E., Frolov S. V. From Sabetta to the Kara Gates: Methodology for calculating the speed of a vessel in ice cover as an integral indicator of ice navigation conditions. Neftegaz.ru, 2020, no. 8 (104), pp. 46—50. (In Russian).
36. Бузуев А. Я., Бровин А. И., Колбатов П. В., Федяков В. Е. Современное состояние зарубежных и отечественных исследований ледяного покрова как среды судоходства. — Обнинск: Информ. центр ВНИИГМИ-МЦД, 1982. — 53 с.
- Buzuev A. Ya., Brovin A. I., Kolbatov P. V., Fedyakov V. E. The current state of foreign and domestic research on ice cover as a shipping environment. Obninsk, Inform. tsentr VNIIGMI-MTSD, 1982, 53 p. (In Russian).
37. Lensu M., Goerlandt F. Big maritime data for the Baltic Sea with a focus on the winter navigation system. Marine Policy, 2019, no. 104, pp. 53—65. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.02.038.

38. Kim E., Smestad B. B., Asbjornslett B. E. Predicting ship speeds in the Arctic using deep learning on historical AIS data. Proceedings of ISOPE-2020, 2020, pp. 622—626.
39. Montewka J., Goerlandt F., Kujala P., Lensu M. Towards probabilistic models for the prediction of a ship performance in dynamic ice. Cold Regions Science and Technology, 2015, no. 112, pp. 14—28. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.12.009.
40. Li F., Montewka J., Goerlandt F., Kujala P. A probabilistic model of ship performance in ice based on full-scale data. Proceedings of ICTIS-2017, 2017. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047852.
41. Fu Sh., Zhang D., Montewka J., Yan X., Zio E. Towards a probabilistic model for predicting ship besetting in ice in Arctic waters. Reliability Engineering and System Safety, 2016, no. 155, pp. 124—136. DOI: 10.1016/j.res.2016.06.010.
42. Вильде О. Капитан арктической нефти // Сиб. нефть. — 2019. — № 159. — С. 30—35.
- Vilde O. Captain of the Arctic oil. Sibirskaya neft', 2019, no. 159, pp. 30—35. (In Russian).
43. Topaj A. G., Tarovik O. V., Bakharev A. A., Kondratenko A. A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. Applied Ocean Research, 2019, vol. 86, pp. 177—187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
44. Бабич Н. Г. Выбор пути плавания во льдах и оценка результативности использования данных навигационной ледовой информации // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. — 2011. — № 10. — С. 28—33.
- Babich N. G. Choosing a navigation route in ice and evaluating the effectiveness of using ice navigational information. Zemlya iz kosmosa: naiboleye effektivnyye resheniya, 2011, no. 10, pp. 28—33. (In Russian).
45. Сазонов К. Е., Добродеев А. А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов: Монография. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2017. — 122 с.
- Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. Ice performance of high-tonnage vessels. Monograph. St. Petersburg, Krylov. gos. nauch. tsentr, 2017, 122 p. (In Russian).

Информация об авторе

Таровик Олег Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44), технический директор, ООО «Бюро Гиперборея» (191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская улица, д. 6, лит. А, пом. 511), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Таровик О. В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 422—435. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435.

MODELS TO PREDICT THE PARAMETERS OF SHIP VOYAGES IN THE ARCTIC: EXISTING APPROACHES AND POSSIBLE WAYS OF DEVELOPMENT

Tarovik, O. V.

Krylov State Research Centre, LLC Burea Hyperborea (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on April 1, 2021

Abstract

Any information support system for Arctic shipping requires a ship transit model as one of the key elements that allows for strategic analysis, operational planning of vessel voyages, and ice routing of a ship. At the same time, there is no single recognized approach to develop such a model, due to the complexity of ice cover in terms of its impact on shipping.

In this article, we have identified and analyzed three principal approaches to predict the parameters of vessel voyages in the Arctic. They are (1) semi-empirical models to estimate the vessel resistance in ice and then calculate propulsion performance, (2) numerical methods to model ship-ice interaction and calculate ice resistance, (3) statistical models to assess the ship speed based on regression equations or neural networks. Analysis of the strengths and weaknesses of each approach allowed us to propose a concept to develop the ship transit model for practical application.

We suggest combining the elements of different approaches, while in general the model should be based on semi-empirical methods. This is due to their computational simplicity, which is important in ice routing tasks, as well as the need for considering ice resistance along with other types of resistance. To compensate for limitations of a semi-empirical approach, we suggest several directions for further research: (1) scaling the ice resistance to obtain a strict correspondence between the calculated and field values of icebreaking capability, (2) development of a methodology to consider the influence of the season and the region of ship operation, (3) methods to estimate resistance in broken ice of different concentration and arbitrary horizontal size, (4) taking into account the direction of compression relative to the ship course, (5) development of methods to assess ice resistance during icebreaker escort operations. The area of application of statistical approaches in a joint model is to model the influence of ice melting stage, hummocking and the differences in ice conditions along the ship route and in the whole region. The article also highlights several additional issues of combining different approaches.

Keywords: *ice resistance, ship transit model, numerical methods, Arctic shipping, ice conditions.*

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation entitled “Technology for tactical and operational control of icebreakers and ice-class vessels under the conditions of year-round navigation along the Northern Sea Route” (project No. 17-79-20162-P).

Information about the author

Tarovik, Oleg Vladimirovich, PhD of Engineering Science, Senior Researcher, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Technical Director, LLC Bureau Hyperborea (pom. 511, lit. A, Kavalergardskaya ul., 6, St. Petersburg, Russia, 191015), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Bibliographic description of the article

Tarovik, O. V. Models to predict the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible ways of development. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 422—435. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435. (In Russian).

© Tarovik O. V., 2021