

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МАНЕВРИРОВАНИЮ СУДНА В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

В статье рассматриваются способы реализации требований Международного полярного кодекса, который вступает в силу с 1 января 2017 г. Ключевым требованием для выполнения требований этого документа является получение Свидетельства судна полярного плавания, для получения которого для каждого судна должны быть разработаны Наставления по эксплуатации судов в полярных водах. При создании данного документа необходимо разработать рекомендации по маневрированию конкретного судна в различных условиях ледового плавания. В настоящей статье для разработки данных рекомендаций предлагается использовать методы математического моделирования. Предложенные в настоящей статье подходы позволяют проанализировать и выработать рекомендации для каждого конкретного судна применительно к конкретным условиям ледового плавания. На основании результатов систематических расчетов с использованием математических моделей, предложенных в настоящей работе, сделан вывод об эффективности маневра «Курс от льдины» при расхождении с отдельными льдинами, а также подтверждены существующие рекомендации по ледовому плаванию судов. Показано, что применение методов математического моделирования маневрирования судна в различных условиях ледового плавания позволит не только выполнить требования Международного полярного кодекса, но и обеспечить безопасное плавание судов в ледовых условиях. В статье показано, что методы математического моделирования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов и конструкций по плаванию в различных ледовых условиях. Они могут быть предложены мировому морскому сообществу как основной метод для исследования вопросов безопасности ледового плавания, разработки рекомендаций для движения во льдах судов различных типов и конструкций, по подготовке судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.

Ключевые слова: Международный полярный кодекс, ледовое плавание судов, математическое моделирование в различных условиях ледового плавания.

Введение

В настоящее время безопасность плавания в полярных водах регулируется основными конвенциями ИМО в этой области: СОЛАС-74, ПДНВ-78, о Грузовой марке, а аспекты предотвращения загрязнения — конвенциями МАРПОЛ 73/78 и о контроле за вредными противоброющими системами на судах. Ожидается вступление в силу Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими.

С 1 января 2017 г. международное судоходство, в дополнение к указанным документам, должно отвечать требованиям «Международного кодекса для судов, эксплуатируемых в полярных водах» (далее — МПК) [1], являющегося обязательным в соответствии с конвенциями СОЛАС-74 и МАРПОЛ 73/78 [2] – [4]. Требования МПК к безопасности не распространяются на суда, совершающие рейсы между портами только Российской Федерации, и такие суда являются предметом Кодекса торгового мореплавания (далее — КТМ) РФ и иных применимых отечественных нормативно-правовых документов.

Плавание судов в акватории Северного морского пути (СМП) регулируется «Правилами плавания», введенными Приказом Минтранса России от 17.01.2013 г. № 7 [5]. Видом регулируемого этими Правилами режима является разрешительный режим, предусматривающий предоставление разрешения на плавание в акватории СМП на основании заявок, указывающих техническую подготовку судна к плаванию, готовность экипажа и характер перевозимого груза.

С вводом в действие МПК в состав документов, включаемых в заявку, в общем случае необходимо включить Свидетельство судна полярного плавания (ССПП) и Наставления по эксплу-

атации судов в полярных водах (НЭПВ), на основании которых Администрация СМП будет выносить решения о выдаче или отклонении разрешений на плавание в акватории СМП. Кроме того, МПК предусматривается отнесение судов к одному из семи так называемых полярных классов Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО), указываемых в ССПП. Таким образом, согласно МПК, в число рассматриваемых Администрацией СМП параметров войдет и полярный класс судна.

Реализация требований МПК, включая разработку НЭПВ и их надлежащее качество, гарантирует переход к новым процедурам обеспечения безопасности и предотвращения загрязнения, предписываемым МПК.

Основная часть

В тексте МПК имеется инструкция по разработке НЭПВ, включающая подробное изложение содержания входящих в него разделов. Однако этот документ [1, разд. 1.1.3 «Маневрирование во льдах», гл. 1 «Эксплуатационные возможности и ограничения»] не содержит каких-либо рекомендаций, оставляя данный вопрос исключительно в сфере ответственности судовладельца и / или разработчика НЭПВ. Тем не менее, поскольку на основании этого документа судну выдается ССПП, а от характера маневрирования каждого конкретного судна в конкретных ледовых условиях зависит его безопасность, этот раздел является ключевым в различных условиях ледового плавания. Он должен содержать рекомендации, индивидуальные для каждого судна с учетом его конструктивных особенностей, маневренных возможностей, состояния обшивки корпуса, характера загрузки и т. п. Кроме того, эти рекомендации должны учитывать конкретные ледовые условия, в которых приходится маневрировать судну. Это может включать в себя расхождение с отдельно плавающими льдинами различных размеров, прохождение частично разреженного льда, плавание в мелкобитом льду и т. п.

В настоящее время существуют рекомендации, разработанные опытными ледовыми капитанами по плаванию в ледовых условиях, однако они носят общий характер, не зависящий от конструктивных особенностей, маневренных возможностей, характера загрузки конкретного судна, т. е. не соответствуют тем принципам МПК, которые заложены в НЭПВ и на основании которых должно выдаваться ССПП конкретному судну. Таким образом, возникает противоречие между требованиями МПК, которые должны применяться к каждому конкретному судну и на основании выполнения которых судну должно выдаваться ССПП, и рекомендациями по маневрированию судна в условиях, которые либо отсутствуют вообще [1], либо носят достаточно общий характер, применение которого для каждого конкретного судна невозможно.

Для разработки конкретных рекомендаций, которые соответствуют требованиям МПК и могут быть включены в НЭПВ, а также использоваться судами в конкретных условиях плавания, рассмотрим ситуацию столкновения судна с отдельной плавающей льдиной (рис. 1). Эта задача приобретает особую актуальность в связи с тем, что основной побудительной причиной для ИМО в принятии МПК явилась гибель лайнера «Эксплорер», получившего ледовые повреждения в условиях аналогичного столкновения и впоследствии затонувшего у берегов Антарктиды в ноябре 2007 г. [6]. Рассмотрим данную задачу с точки зрения математического моделирования движения судна до столкновения и в момент столкновения со свободно плавающей льдиной. Этот подход был впервые использован в работе [7], где было показано, что применение перед столкновением с другим судном или иным препятствием маневра «Курс от судна» способствует возникновению гидродинамического отталкивания перед столкновением и соответственно «разведению» судна с препятствием, с которым предстоит столкновение. Этим препятствием может быть и свободно плавающая льдина. Тем самым снижается опасность повреждения корпуса судна при столкновении.

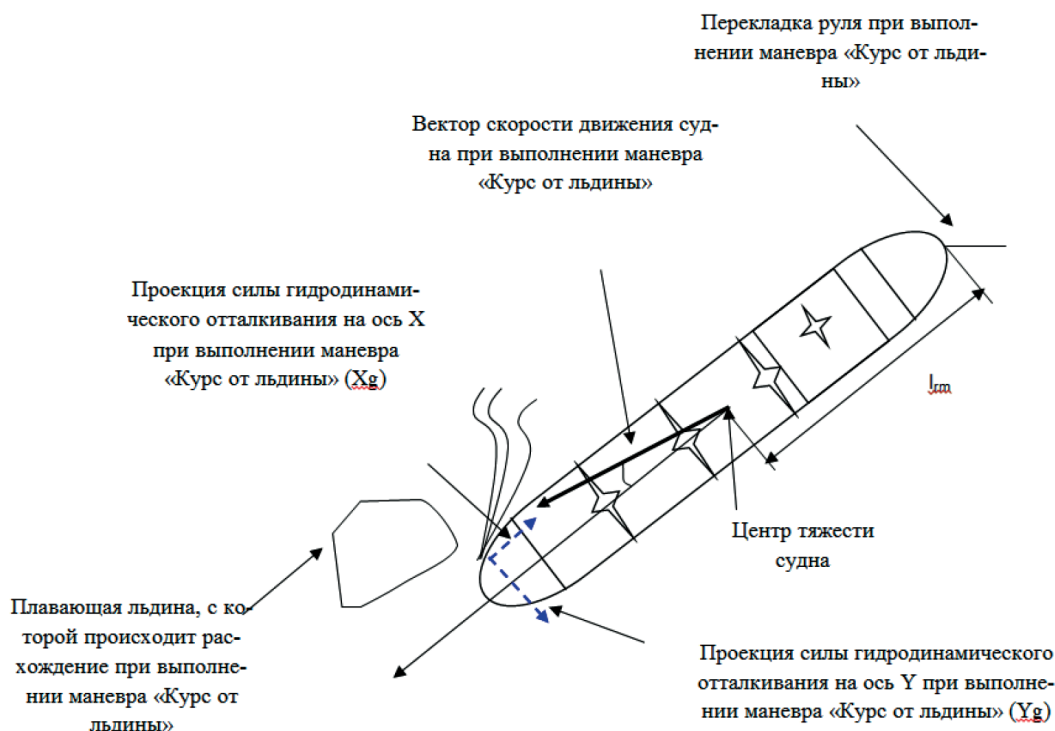


Рис. 1. Возникновение силы гидродинамического отталкивания при выполнении маневра «Курс от льдины» при сближении с плавающей льдиной

В данном случае аналогичный маневр может быть назван «Курс от льдины». Уравнения движения при выполнении маневра «Курс от льдины» с максимальным углом перекладки могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} -(m + \lambda_{11})(dv/dt)\cos\beta + (m + \lambda_{11})v_1(d\beta/dt)\sin\beta - m\omega\sin\beta - X_g - X_a + P_e - X_r &= 0; \\ -(m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + (m + \lambda_{22})v(d\beta/dt)\cos\beta - m\omega\cos\beta - \lambda_{26}d\omega/dt - Y_g + Y_a + Y_r &= 0; \\ -(J_z + \lambda_{26})(d\omega/dt) - \lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} &= 0; \\ \delta_R &= \delta_{Rmax} \end{aligned} \quad (1)$$

или

$$\begin{aligned} (dv/dt) &= \left(-(m + \lambda_{11})v(d\beta/dt)\sin\beta + m\omega\sin\beta + X_g + X_a - P_e + X_r \right) / \left(-(m + \lambda_{11})\cos\beta \right); \\ (d\omega/dt) &= \left(-\lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} \right) / (J_z + \lambda_{26}); \\ (d\beta/dt) &= \left((m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + m\omega\cos\beta + \lambda_{26}(d\omega/dt) + Y_g - Y_a - Y_r \right) / \left((m + \lambda_{22})v\cos\beta \right); \\ \delta_R &= \delta_{Rmax}, \end{aligned} \quad (2)$$

где v — скорость судна, м/с; ω — угловая скорость, 1/с; β — угол дрейфа, град; Y_r — боковая сила на руле судна, кН; Y_g, X_g — проекции гидродинамической силы на оси Y и X (проекция силы гидродинамического отталкивания, отводящие корпус судна от льдины до столкновения), кН; Y_a — проекция аэродинамической силы на ось Y , кН; l_{rm} — расстояние баллера руля от центра тяжести (ЦТ) судна, кН; M_g и M_a — соответственно моменты гидро- и аэродинамических сил, кН·м; m — масса (массовое водоизмещение) судна, т; $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ — присоединенные массы судна, т; $J_z + \lambda_{26}$ — соответственно момент инерции и присоединенный момент инерции относительно вертикальной оси z , т·м²; δ_R — угол перекладки руля при выполнении маневра «Курс от льдины», град; δ_{Rmax} — максимальный угол перекладки руля при выполнении маневра «Курс от льдины», град; P_e — тяга гребного винта, кН; t — время, с.

Основные параметры движения судна (скорость движения судна — v , угловая скорость — ω , угол дрейфа — β) до начала столкновения с льдиной могут быть рассчитаны путем интегрирования выражений (2), полученных из выражения (1), по времени (t) до момента столкновения судна и льдины. Как следует из анализа результатов расчета, выполненных по уравнениям (2), при применении маневра «Курс от льдины» гидродинамическое отталкивание, возникающее в носовой оконечности судна, способствует отводу свободно плавающей льдины от корпуса судна и корпуса судна льдины. Это снижает вероятность столкновения и, следовательно, повреждения корпуса при столкновении судна с льдиной, что является положительным фактором. Расчеты по уравнениям (2) показывают, что если маневр выполнен своевременно, то для свободно плавающей льдины ограниченных размеров силы гидродинамического отталкивания может быть достаточно для полного предотвращения столкновения судна с льдиной. Таким образом, маневр, выполняемый по принципу «Курс от льдины», может быть эффективным для предотвращения непосредственного столкновения с ней и снижения опасности повреждения корпуса судна при столкновении со свободно плавающей льдиной.

В том случае, если до столкновения льдина была обнаружена на судне и был предпринят маневр «Курс от льдины» на уклонение от нее, но столкновения избежать не удалось, то уравнения движения судна при столкновении со свободно плавающей льдиной будут иметь следующий вид (рис. 2):

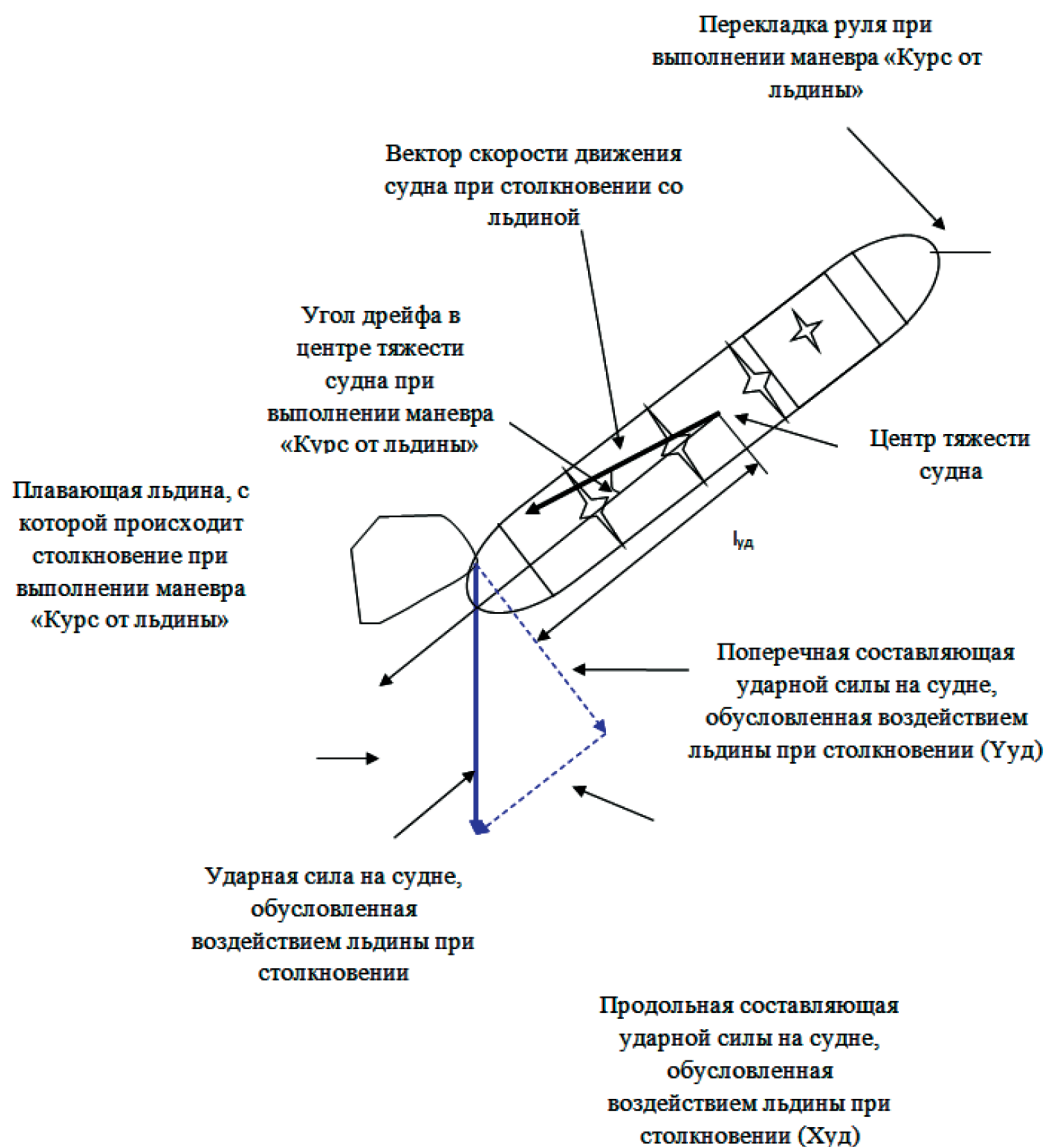


Рис. 2. Построение проекций ударных сил на оси, связанные с движением судна при столкновении с плавающей льдиной

$$\begin{aligned} -(m + \lambda_{11})(dv/dt)\cos\beta + (m + \lambda_{11})v(d\beta/dt)\sin\beta - m\omega\sin\beta - X_g - X_a + P_e - X_r + X_{уд} &= 0; \\ -(m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + (m + \lambda_{22})v(d\beta/dt)\cos\beta - m\omega\cos\beta - \lambda_{26}d\omega/dt - Y_g + Y_a + Y_r - Y_{уд} &= 0; \\ -(J_z + \lambda_{26})(d\omega/dt) - \lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g + M_a - Y_r l_{rm} - M_{уд} &= 0; \\ \delta_R &= \delta_{R\max}. \end{aligned} \quad (3)$$

или

$$\begin{aligned} (dv/dt) &= \left(-(m + \lambda_{11})v(d\beta/dt)\sin\beta + m\omega\sin\beta + X_g + X_a - P_e + X_r - X_{уд} \right) / \left(-(m + \lambda_{11})\cos\beta \right); \\ (d\omega/dt) &= \left(-\lambda_{26}((dv/dt)\sin\beta + (d\beta/dt)v\cos\beta) - M_g - M_{уд} + M_a - Y_r l_{rm} \right) / \left(-(J_z + \lambda_{26}) \right); \\ (d\beta/dt) &= \left((m + \lambda_{22})(dv/dt)\sin\beta + m\omega\cos\beta + \lambda_{26}(d\omega/dt) + Y_g + Y_{уд} - Y_a - Y_r \right) / \left((m + \lambda_{22})v\cos\beta \right); \\ \delta_R &= \delta_{R\max}. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) $X_{уд}$, $Y_{уд}$, $M_{уд}$ могут быть получены по выражениям, которые аналогичны используемым в работе [7]:

$$\begin{aligned} X_{уд} &= m_{\text{л}} dv/dt \cos Y; \\ Y_{уд} &= m_{\text{л}} (dv/dt) \sin Y; \\ M_{уд} &= Y_{уд} l_{уд}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $m_{\text{л}}$ — масса льдины, с которой происходит столкновение, т; Y — угол столкновения со льдиной, град; $l_{уд}$ — отстояние от места столкновения со льдиной до центра тяжести судна, м.

Основные параметры движения судна (v , ω , β) после начала столкновения со льдиной могут быть получены путем интегрирования выражений (4), полученных из выражения (3) по времени (t) до момента окончания столкновения судов. Начальные параметры (v , ω , β) при интегрировании должны быть получены по результатам расчета уравнений (2).

Как следует из схем, приведенных на рис. 3 и 4, сила, направленная непосредственно на разрушение обшивки корпуса судна, перпендикулярно обшивке корпуса — $Y_{уд}$, зависит от угла дрейфа судна β и от угла заострения ватерлинии корпуса по отношению к диаметральной плоскости судна в месте контакта с льдиной при ударе ($Y_{дп}$) и может быть определена в виде

$$Y_{уд} = m_{\text{л}} (dv/dt) \sin(Y_{дп} + \beta). \quad (6)$$

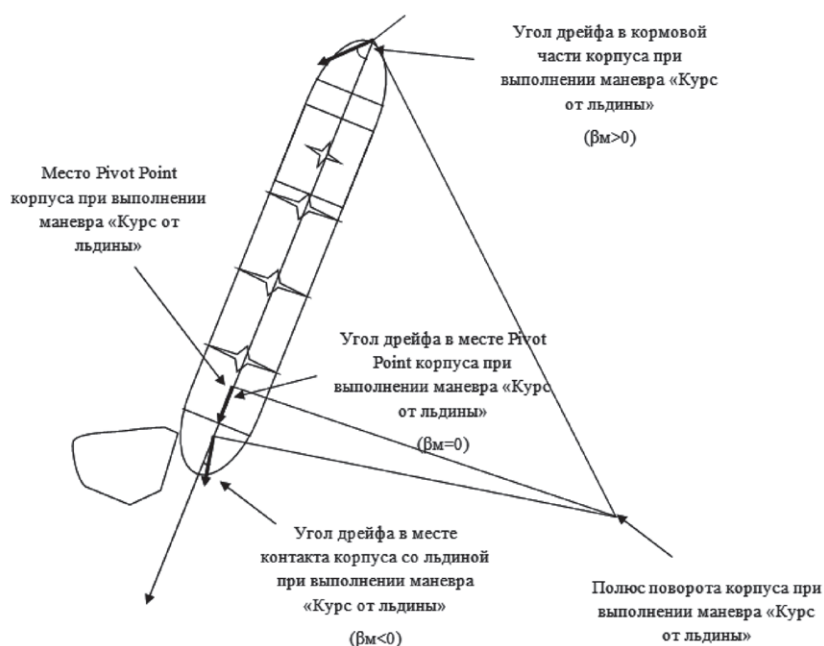


Рис. 3. Углы дрейфа в различных частях корпуса судна при выполнении маневра «Курс от льдины»

Если контакт происходит непосредственно с форштевнем корпуса судна без изменения курса судна перед столкновением, при условии отсутствия угла дрейфа $\beta = 0^\circ$, то $Y_{\text{дп}} = 90^\circ$ (рис. 4, а) и $Y_{\text{уд}}$ в соответствии с выражением (6), достигают максимального значения.

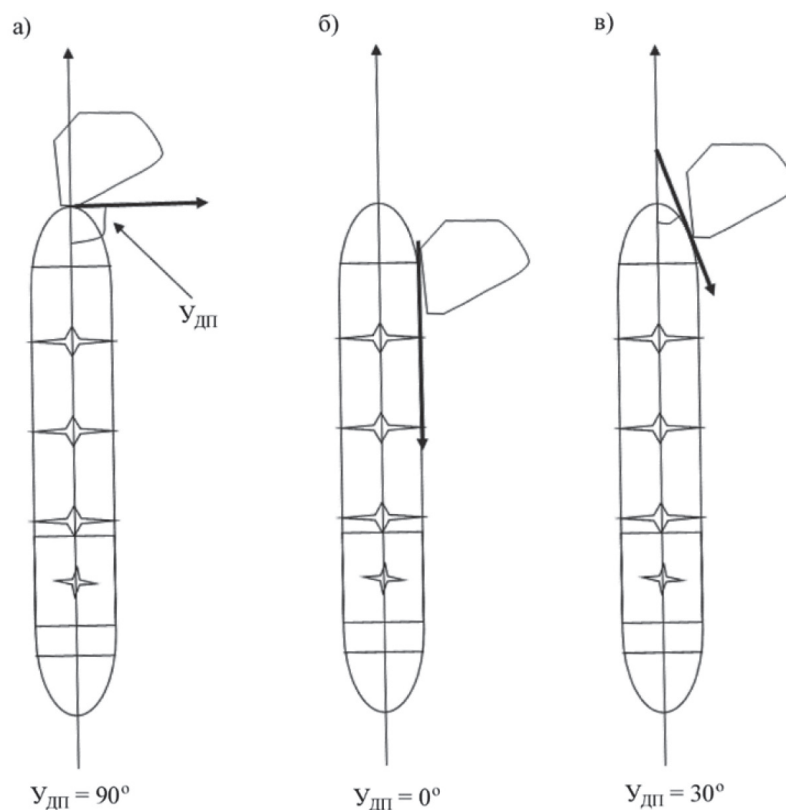


Рис. 4. Определение $Y_{\text{дп}}$ судна в зависимости от места столкновения со льдиной

Если контакт с корпусом судна происходит в районе борта (см. рис. 4, б), то $Y_{\text{дп}} = 0^\circ$ и при нулевом угле дрейфа судна ($\beta = 0^\circ$), в соответствии с выражением (6), $Y_{\text{уд}} = 0$. Таким образом, разрушения корпуса судна не происходит, так как судно получает «скользящий» удар от льдины. В случае, если контакт происходит с корпусом судна в скулы судна (см. рис. 4, в), то в данном случае $Y_{\text{дп}} = 30^\circ$, при нулевом угле дрейфа судна ($\beta = 0^\circ$), в соответствии с выражением (6), сила, направленная на разрушение обшивки корпуса, снижается в два раза по сравнению с той силой, которая возникала бы при контакте форштевня судна со льдиной. Таким образом, опасность разрушения корпуса при столкновении судна со льдиной может зависеть от маневра, предпринимаемого судном перед столкновением, конструктивных особенностей и прочности отдельных частей корпуса. С точки зрения содержания НЭПВ применительно к МПК особый интерес представляет маневрирование судна при плавании во льдах, которое может быть исследовано с использованием выражений (1) – (6).

Как показывают результаты систематических расчетов, особый интерес представляет собой исследование положения так называемой *Pivot Point*, т. е. той точки на корпусе, в которой местный угол дрейфа $\beta_m = 0^\circ$ при различных вариантах маневрирования судна. Как следует из рис. 3, при выполнении маневра «Курс от льдины» местные углы дрейфа на корпусе, расположенные в корму от *Pivot Point*, положительны ($\beta_m > 0^\circ$), а в нос от *Pivot Point* — отрицательны ($\beta_m < 0^\circ$). Таким образом, выполнение маневра «Курс от льдины» до столкновения дополнительно снижает опасность разрушения корпуса, так как уменьшается значение $Y_{\text{уд}}$, определяемое по выражению (6), что снижает опасность повреждения корпуса.

В результате выполнения маневра «Курс от льдины» снижается опасность повреждения корпуса судна, независимо от того, какой у него угол заострения ватерлинии $Y_{\text{дп}}$ (независимо

от типа и конструктивных особенностей судна). Таким образом, всем судам при расхождении со свободно плавающей льдиной может быть рекомендован маневр «Курс от льдины» как универсальный маневр, направленный на снижение опасности повреждения корпуса судна в том случае, если предполагаемое столкновение со льдиной произойдет ближе к носу судна, чем располагается его Pivot Point.

Использование расчетов с использованием методов математического моделирования по выражениям (1) – (6) показывает, что для судов с различным углом $У_{дп}$ маневр «Курс от льдины» в условиях ледового плавания может иметь различную эффективность в зависимости от конструктивных особенностей судна и расстояния обнаружения льдины от форштевня судна. Еще одним преимуществом использования методов математического моделирования является возможность определения максимального угла отворота судна при выполнении маневра «Курс от льдины» во избежание повреждений судна при столкновении со льдиной.

Как следует из результатов систематических расчетов, выполненных в соответствии с выражениями (1) – (6), для того, чтобы изменение курса было эффективным и приводило к снижению опасности повреждения корпуса при столкновении, угол отворота от льдины при выполнении маневра «Курс от льдины» может быть определен из рис. 5.



Рис. 5. Изменение курса судна при выполнении маневра «Курс от льдины» для снижения опасности повреждения корпуса

Таким образом, на основании использования математического моделирования движения судов в условиях ледового плавания могут быть разработаны как общие, так и конкретные рекомендации для каждого судна в условиях ледового плавания, как это требуется в соответствии с НЭПВ.

Результаты систематических расчетов, выполненных по математическим моделям (1) – (6), позволили разработать общие рекомендации для различных ситуаций ледовых условий, которые подтверждаются существующей практикой и опытом ледового плавания и ледовых аварий [6] – [11]. К этим рекомендациям относятся следующие:

1. Для судов ледового плавания с большим углом заострения ватерлинии, имеющих усиленный ледовый пояс в носовой оконечности с максимальным усилением в районе форштевня при плавании в разреженном льду с отдельно плавающими льдинами, необходимо *«брать льдины на форштевень»* без изменения курса и выполнения маневра *«Курс от льдины»*. При наличии сплошного льда с перемычками их также надо пересекать форштевнем без изменения курса судна.

2. Для судов ледового плавания с большим и малым углом заострения ватерлинии при плавании в сплошном льду при наличии промоин и трещин во льду следует двигаться вдоль промоины и трещины, максимально расширяя их своим корпусом.

3. При расхождении судов с отдельно плавающими льдинами при своевременном обнаружении льдины маневр *«Курс от льдины»* может быть рекомендован для всех судов.

Выводы

1. Использование методов математического моделирования позволяет выработать конкретные рекомендации по обеспечению безопасности ледового плавания для каждого судна и конкретных ледовых условий плавания, как это требуется НЭПВ.

2. С использованием предложенных в настоящей работе расчетов с использованием методов математического моделирования показано, что маневр *«Курс от льдины»* при расхождении с отдельными льдинами может быть рекомендован для всех судов.

3. Анализ результатов расчетов маневрирования судов с использованием математического моделирования показывает совпадение полученных рекомендаций с существующим опытом ледового плавания.

4. Результаты математического моделирования дают возможность выработать как общие рекомендации, которые могут быть использованы для всех судов ледового плавания, так и конкретные маневры для каждого судна в условиях ледового плавания.

5. Методы математического моделирования могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов и конструкций по плаванию в различных ледовых условиях. Они могут быть предложены мировому морскому сообществу и ИМО как основной метод для исследования вопросов безопасности ледового плавания, разработки рекомендаций для движения во льдах судов различных типов и конструкций, а также подготовки судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах. Резолюция ИМО MSC.385(94). — 2014.

2. Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года. Резолюция ИМО MSC.386(94). — 2014.

3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС- 74).

4. Международная конвенция о предотвращении загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 г. к ней с поправками (МАРПОЛ 73/78).

5. Правила плавания в акватории Северного морского пути / Утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013 г. № 7.

6. Шурпак В. К. Полярный кодекс ИМО: предварительный анализ первой части (требования по безопасности) / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38–39. — С. 8–17.

7. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: (05.22.19); защищена (19.11.2012); утв. (20.05.2013) / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

8. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.

9. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
10. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.
11. Kheisin D. E. Ice navigation qualities of ships / D. E. Kheisin, Y. N. Popov. — 1973. — №. CRREL- TL417.

RECOMMENDATION ON MANEUVERING THE VESSEL IN ICE CONDITIONS

The article discusses ways of implementing the requirements of the International Polar code, which comes into force on 1 January 2017. A key requirement to meet the requirements of the international polar code is to obtain evidence of the ship's Arctic voyage, for which for each vessel should be developed guidelines for operation of vessels in polar waters. When creating this document should develop recommendations for maneuvering the concrete of the vessel in various conditions of ice navigation. In this article for developing these recommendations, it is proposed to use methods of mathematical modeling. Proposed in the present article ing approaches to analyze and develop recommendations for each specific ship for specific conditions of ice navigation. Based on the results of systemic- ing calculations on the mathematical models proposed in the present work, the conclusion about the effectiveness of the maneuver "Course from the ice" with a separate ice floes, and confirmed existing recommendations for ice navigation. It is shown that application of methods of mathematical simulation of the maneuvering of the vessel in various conditions of ice navigation will not only meet the requirements of the International polar code, but also to ensure the safe navigation of ships in ice conditions. The paper shows that mathematical modeling techniques can be used to develop practical recommendations for ships of various types and designs of swimming in different ice conditions. They may be offered the global maritime community as the main method for researching the issues of safety of ice navigation, to develop recommendations for traffic in ice vessels of various types and designs, for the training of skippers to sail in specific ice conditions.

Keywords: International Polar code, ice conditions, mathematical modeling in various conditions of ice navigation.

REFERENCES

1. Mezhdunarodnyj kodeks dlja sudov, jekspluatirujushhihsja v poljarnyh vodah. Rezoljucija IMO MSC.385(94). 2014.
2. Popravki k Mezhdunarodnoj konvencii po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda. Rezoljucija IMO MSC.386(94). 2014.
3. Mezhdunarodnaja Konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74) s popravkami.
4. Mezhdunarodnaja konvencija o predotvrashhenii zagriznenija s sudov 1973 goda, izmenennaja protokolom 1978 g. k nej s popravkami (MARPOL 73/78).
5. Russian Federation. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 17.01.2013 № 7. Pravila plavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.
6. Shurpyak, V. K. "IMO Polar Code: preliminary review of first part (safety requirements)." *Russian Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 38–39 (2015): 8–17.
7. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov. Dr. diss. SPb., 2012.
8. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spa-senija: monografija*. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
9. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
10. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. "Breaking the Ice: Navigation in the Arctic." *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.
11. Kheisin, D. E., and Y. N. Popov. *Ice navigation qualities of ships*. 1973. №. CRREL-TL417.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Развозов Сергей Юрьевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_mus@gumrf.ru
Петухов Павел Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ershov Andrey Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Razvozov Sergey Jrevich
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
razvozov.su@mail.ru
Petuhov Pavel Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Ershov Andrey Alexandrovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-29-38
УДК 519. 22:004.67

**Д. А. Акмайкин,
С. Ф. Ключева,
П. А. Салюк**

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРАФА МАРШРУТА СУДНА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В современной теории графов для исследователей актуален класс задач, связанных с формированием графа, построением его вершин и ребер на основе заданных условий и большого числа исходных данных. Такие задачи относят к классу нереализуемых задач. Методы искусственного интеллекта, кластерного анализа, применение эвристических и эволюционных алгоритмов совместно с новыми компьютерными технологиями позволяют решать подобные задачи наиболее эффективным образом. Задача формирования графа маршрута движения судна относится к классу таких задач. Эвристика заключается в возможности применения результатов кластеризации исходной цифровой базы данных как основы для формирования вершин и ребер графа. Данная задача является предметом рассмотрения статьи. В статье используется цифровая база района плавания, которая включает отметки глубин, высот и мелей. Метод кластеризации осуществляется на базе метрики, учитывающей расстояние между точками на карте и разность глубин. Приведены численные значения параметров кластеризации и числовые значения расчета критерия качества кластеризации для различных значений коэффициентов метрики. Разработан, реализован программно и подробно описан алгоритм кластеризации. Приведены результаты программного моделирования алгоритма на участке, характеризующимся извилистой береговой чертой, наличием мысов, мелей, бухт и заливов, а также распределением островов в районе построения маршрута. На основе кластеризации выполнено формирование графа путей движения судна. Приведен алгоритм построения вершин и ребер графа. Программная модель позволяет визуализировать исходную цифровую базу данных и полученные результаты. В заключение указаны основные необходимые направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: кластеризация, метрика, качество кластеризации, путь судна, электронная навигационная карта.

Введение

Задачи на графах реализуют большой круг прикладных проблем во многих областях науки и техники. Среди задач, основанных на современной теории графов, актуален для исследования класс задач, связанных с формированием исходного графа, его вершин и ребер на основе некото-