

УДК: 532.3; 551.326.1

ВЕТРОВОЙ ДРЕЙФ, РАЗРУШЕНИЕ И НАГРОМОЖДЕНИЕ ОБЛОМКОВ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. В. К. Гончаров*

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: vkgonch@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

Статья содержит модель ветрового дрейфа ледяного поля, которая позволяет оценить скорость дрейфа в зависимости от скорости ветра и размеров ледяного поля, а также кинетическую энергию ледяного поля, которая при его столкновении с неподвижным препятствием выделится и вызовет хрупкое разрушение и образование обломков, формирующих нагромождения перед стационарными шельфовыми сооружениями. Основой для исследования явилось допущение о том, что воздействие ветра и водной массы на ледяное поле можно описать методами, использующимися в аэродинамике и теории корабля. Модель процесса образования нагромождения обломков льда и оценка его размеров основывались на допущении в том, что вся кинетическая энергия ледяного поля расходуется на его хрупкое разрушение, а формирование нагромождения обломков происходит по тем же закономерностям, что и у естественных нагромождений обломков льда: гряд торосов и стамух. Выполненное моделирование дало возможность связать размеры нагромождения обломков льда с размерами ледяных полей и скоростью ветра. Созданная модель и результаты компьютерного моделирования могут быть использованы для практических оценок и прогнозирования размеров нагромождений льда на стационарных платформах и терминалах в морях Арктики и в других замерзающих морях.

Ключевые слова: морской лед, дрейф, ветер, кинетическая энергия, разрушение, обломки льда, нагромождение

DOI: 10.31857/S0030157424060023, **EDN:** FIUAQQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Нагромождения льда на береговых и шельфовых сооружениях достигают особенно больших объемов в арктических морях и затрудняют функционирование буровых и добывающих платформ и морских терминалов. Поэтому для эффективного контроля ледовых условий вблизи сооружений необходим прогноз этого явления в соответствии с меняющимися гидрометеорологическими условиями. Дрейф ледяного покрова как целого и отдельных ледяных полей, их давление на препятствие и соударение с препятствием сопровождаются частичным разрушением на обломки льда, которые, погружаясь под лед и поднимаясь на поверхность льда, формируют нагромождения и являются очевидным и понятным механизмом рассматриваемого явления. Интенсивность соударения с препятствием или величина давления в месте контакта льда с препятствием зависят от скорости вызываемого ветром и течениями дрейфа ледяного покрова или отдельных льдин.

Это явление в статическом представлении, когда неподвижное ледяное поле, находящееся в контакте с препятствием, разрушается под действием напора, возникающего в месте контакта вследствие трения ветра на поверхности ледяного поля, исследовалось ранее, и результаты содержатся в публикации [5].

Динамическое представление, при котором ледяное поле дрейфует под действием ветра по морской поверхности и сталкивается с неподвижным препятствием, затрачивая кинетическую энергию на хрупкое разрушение льда, требует математического описания дрейфа ледяного поля с целью оценки скорости его дрейфа и кинетической энергии. Задача аналитического описания дрейфа ледяных полей и ледяного покрова Северного Ледовитого океана изучается уже длительное время, и полученные результаты обобщены в монографиях [6, 7, 22]. Практическое применение этих результатов в рассматриваемой проблеме требует подробных сведений о гидрометеорологической обстановке в рассматриваемой акватории, либо

существенного упрощения решений, что обеспечивает их адекватность поставленной задаче.

Перспективным представляется применение к описанию дрейфа изолированного ледяного поля методов теории корабля и аэродинамики, используемых для расчета ходкости судов и движения тел в жидкости на основе схематизации их формы и интегрального представления сопротивления движению со стороны окружающей среды [3, 11]. Этот подход использовался ранее, и полученные результаты, определяющие скорость дрейфа и объем обломков льда в зависимости от скорости ветра и размеров ледяного поля, содержатся в публикациях [4, 18, 19].

В исследовании, результаты которого изложены далее, рассматриваются последствия разрушения ледяного поля в квазистатической постановке, а именно: оцениваются только форма и размеры нагромождения обломков льда по завершении процесса разрушения. То есть собственно процесс разрушения ледяного поля и перемещения обломков льда в пространстве не анализируются. Предполагается, что указанные процессы завершились и возникло статически устойчивое образование с некоторыми фиксированными размерами, которые зависят от размеров обломков льда, подобно насыпям из обломков горных пород на поверхности земли.

В этом случае допустимо считать, что возникшее вблизи неподвижного препятствия нагромождение обломков льда по своей геометрии подобно торосам и грядам торосов, естественно образующимся в морях Арктики при столкновении дрейфующих льдов с припаем. Форма и размеры торосов достаточно хорошо исследованы [21, 23, 24, 26], и эти материалы в исследовании [19] использованы для оценки размеров нагромождений льда перед искусственными сооружениями на шельфе.

Данная статья содержит обоснование и изложение математической модели установившегося ветрового дрейфа ледяного поля и результаты моделирования этого процесса в виде зависимости скорости дрейфа и кинетической энергии от собственных размеров ледяного поля и скорости ветра. Эти результаты послужили в качестве исходных для оценки объема обломков льда, которые при хрупком разрушении могут образоваться при столкновении с неподвижным препятствием.

Далее в статье представлена геометрическая модель нагромождения льда перед препятствием на глубокой воде и результаты расчетов, иллюстрирующих зависимость размеров нагромождения

льда от размеров ледяного поля и скорости ветра.

В мелководной акватории условия формирования нагромождения обломков меняются, так как дном ограничивается возможность перемещения обломков льда под поверхность ледяного покрова. В этом случае есть основание предполагать, что форма нагромождения оказывается подобной форме стамух, возникающих при выносе скопления обломков льда на мелководье. На основе результатов измерения размеров стамух и их соотношения [1, 12, 20] построена геометрическая модель нагромождения и выполнены расчеты зависимости размеров нагромождения от размеров ледяного поля и скорости ветра.

Разработанные модели ветрового дрейфа ледяного поля, его разрушения и формирования нагромождений, безусловно, нуждаются в проверке специальными наблюдениями в естественных полевых условиях. В настоящее время для этой цели имеются только фотографии нагромождений льда перед платформой Приразломная в Печорском море, и полученные результаты соизмеримы нагромождениям на доступных фотографиях.

2. ВЕТРОВОЙ ДРЕЙФ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ

Уравнение движения ледяного поля при совместном воздействии ветра и течения, меняющихся по величине и направлению, представлено в работах [4, 18]. В данной статье рассматривается частная задача: движение ледяного поля, имеющего ограниченные размеры и массу, под действием ветра. Предполагается, что ледяное поле не контактирует с другими льдами и дрейфует достаточно далеко от берегов акватории, чтобы не иметь контакта с береговой линией и чтобы изменение глубины не влияло на скорость его движения. Ветер предполагается однородным на площади ледяного поля, и его характеристикой является вектор скорости, который не меняется во времени по направлению (вдоль оси OX) и модулю (скорости). Предполагается, что водная масса в акватории под ледяным полем неподвижна. Влиянием эффекта Кориолиса на траекторию и скорость дрейфа пренебрегаем, так как искривление траектории не влияет на величину кинетической энергии ледяного поля. Реальную форму в плане ледяного поля представляем в виде ориентированного вдоль оси OX прямоугольника с размерами L_{lf} и B_{lf} . Схема движения ледяного поля показана на рис. 1.

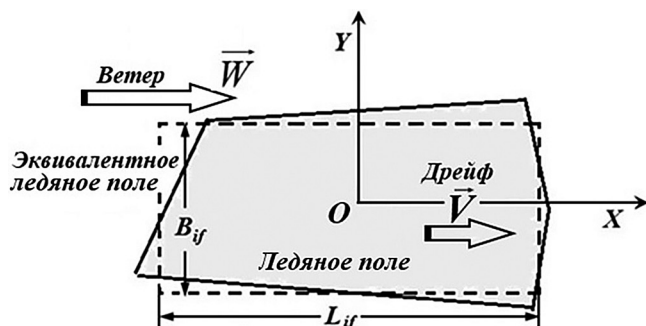


Рис. 1. Схема дрейфа ледяного поля под действием ветра. Пунктиром показано прямоугольное ледяное поле с размерами L_{if} и B_{if} , эквивалентное по площади реальному ледяному полю.

Воздействие ветра на ледяное поле представляет собой сумму трения воздуха на надводной поверхности и лобовой напор на надводной части наветренной стороны ледяного поля. Сопротивление движению складывается из трения воды на нижней поверхности ледяного поля и лобового сопротивления на погруженной части его подветренной стороны. Для аналитического представления этих сил используются методы аэродинамики и теории корабля [3, 11]. С целью упрощения решения реальную форму ледяного поля представляем “эквивалентным” ледяным полем, которое “в плане” является равным по площади прямоугольником, боковые стороны вертикальны, а верхняя и нижняя поверхности горизонтальные и ровные.

При принятых допущениях скорость ветрового дрейфа определяется балансом воздействия ветра на ледяное поле и сопротивления движению со стороны водной массы, которое зависит от скорости дрейфа. Скорость движения (дрейфа) ледяного поля в изложенной постановке можно определить из уравнения баланса сил, действующих на ледяное поле:

$$F_{fr}(w-v) + P_{hp}(w-v) = R_{fr}(v) + R_{hr}(v). \quad (1)$$

В этой формуле F_{fr} — сила трения ветра, P_{hp} — скоростной напор ветра, R_{fr} — сопротивление трения водной массы, R_{hr} — лобовое сопротивление со стороны водной массы, w — скорость ветра, v — скорость движения (дрейфа) ледяного поля. Схема действия этих сил показана на рис. 2. Чтобы не рассматривать ориентацию ледяного поля относительно траектории движения, в качестве характерного линейного размера для вычисления воздействия ветра и сопротивления дрейфу принята средняя величина, определяемая следующей формулой (S_{if} — площадь ледяного поля):

$$L_f = \sqrt{L_{if} B_{if}} = \sqrt{S_{if}}. \quad (2)$$

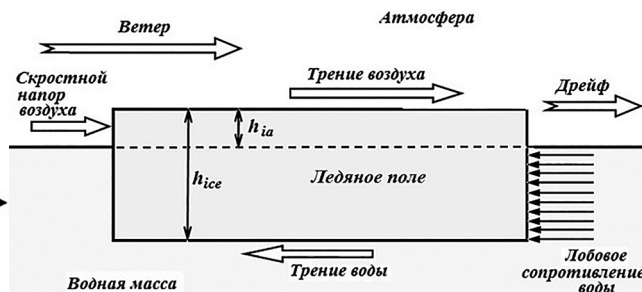


Рис. 2. Силы, действующие на дрейфующее ледяное поле (высота надводной части ледяного поля преувеличена для иллюстрации действующих на него сил).

Силы трения воды и воздуха определяются следующим образом:

$$F_{fr} = \frac{1}{2} \zeta_{fr}^a \rho_a (w-v)^2 S_{if}, \quad R_{fr} = \frac{1}{2} \zeta_{fr}^w \rho_w v^2 S_{if}. \quad (3)$$

В этих формулах $\zeta_{fr}^a, \zeta_{fr}^w$ — коэффициенты трения воздуха и воды соответственно, зависящие от числа Рейнольдса Re , ρ_a, ρ_w — массовая плотность воздуха и воды. Величины числа Рейнольдса и коэффициент сопротивления на границе раздела лед — воздух представим следующим образом [7]:

$$Re_{ai} = \frac{w_{sf}}{v_a} L_f, \quad \zeta_{fr}^a = \frac{0.455}{(\lg Re_{ai})^{2.58}}. \quad (4)$$

В формулах (4) w_{sf} — скорость ветра на поверхности ледяного поля, которая определяется с учетом возвышения ее над поверхностью воды h_{ia} . Эта величина связана с толщиной ледяного поля h_{ice} , с плотностью льда γ_{ice} и морской воды γ_w следующим образом

$$h_{ia} = \frac{\gamma_w - \gamma_{ice}}{\gamma_w} h_{ice}. \quad (5)$$

Используя известное выражение для изменения величины скорости ветра в приповерхностном пограничном слое над морем [6, 8, 16], получаем следующее выражение:

$$w_{sf} = w(h_{ia}) = W_{10} \left(1 + \frac{\sqrt{c_w}}{\chi_0} \ln \frac{h_{ia}}{z_{10}} \right) - v. \quad (6)$$

В этой формуле W_{10} — скорость ветра на высоте $z_{10} = 10$ м, $\chi_0 = 0.4$ — постоянная Кармана и c_w — коэффициент трения морской поверхности. Коэффициент c_w зависит от степени взволнованности морской поверхности, и для морской поверхности, покрытой дрейфующими льдами, препятствующими развитию ветрового волнения, этот коэффициент может быть оценен его минимальной величиной: $c_w = 1.11 \cdot 10^{-3}$ [8, 16].

Сопротивление трения ледяного поля о водную массу зависит от скорости дрейфа v и определяется подобным выражению (4) образом, то есть

$$\text{Re}_{wi} = \frac{v}{w} L_f, \quad \zeta_{fr}^w = \frac{0.455}{(\lg \text{Re}_{wi})^{2.58}}. \quad (7)$$

Лобовой напор ветра и лобовое сопротивление водной массы представим следующим образом:

$$P_{hp} = \frac{1}{2} \zeta_{hp}^a \rho_a (w - v)^2 h_{ia} L_f, \quad (8)$$

$$R_{hp} = \frac{1}{2} \zeta_{hp}^w \rho_w v^2 (h_i - h_{ia}) L_f.$$

Коэффициенты лобового напора и сопротивления можно принять одинаковыми для надводной и подводной частей ледяного поля. Передний и задний торцы следует рассматривать в качестве протяженных преград и принять $\zeta_{vh}^a = \zeta_{vh}^w = 2.1$ [16].

Подставляя полученные результаты в (4), получаем следующее трансцендентное уравнение, позволяющее оценить скорость дрейфа ледяного поля в зависимости от его размеров и скорости ветра:

$$\rho_a \left[\zeta_{hp}^a h_{ia} L_f + \zeta_{fr}^a S_{if} \right] (w - v)^2 - \rho_w \left[\zeta_{hp}^w (h_{ice} - h_{ia}) L_f + \zeta_{fr}^w S_{if} \right] v^2 = 0. \quad (10)$$

Трансцендентное уравнение (10) не имеет решения в явном виде: зависимости скорости дрейфа от скорости ветра $v = f(w)$. Поэтому уравнение решается численно, и результаты в качестве компонента используются в последующем моделировании образования нагромождения обломков ледяного поля перед неподвижным препятствием. На рис. 3 показана зависимость скорости дрейфа ледяного поля (размеры: $L_{if} = 200$ м, $B_{if} = 80$ м) от скорости ветра для различных толщин льда. Здесь же представлены зависимости для скорости дрейфа сплошного ледяного покрова (2% от скорости ветра [7, 22]) и скорости ветрового дрейфового течения в отсутствие ледяного покрова на широте $= 70^\circ$ с.ш., оцениваемая по известному решению Экмана [8]:

$$v_{wd} = \frac{0.0127 W_{10}}{\sqrt{\sin \varphi}}. \quad (11)$$

Представленные материалы показывают, что скорость ветрового дрейфа отдельного ледяного поля существенно превышает скорость ветрового дрейфового поверхностного течения (в отсутствие льда) и скорость ветрового дрейфа сплош-

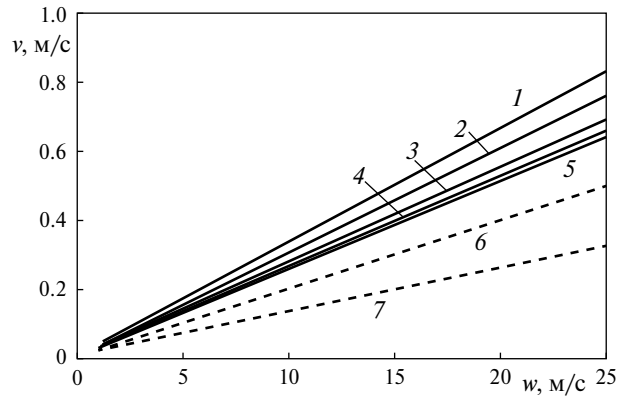


Рис. 3. Зависимость скорости дрейфа ледяного поля от скорости ветра при различных толщинах льда. Обозначения: 1 – $h_{ice} = 0.25$ м, 2 – $h_{ice} = 0.5$ м, 3 – $h_{ice} = 1$ м, 4 – $h_{ice} = 1.5$ м, 5 – $h_{ice} = 2$ м, 6 – скорость дрейфа сплошного ледяного покрова, 7 – скорость ветрового течения.

ного ледяного покрова в той же акватории. Этот эффект можно объяснить следующим образом: изолированное ледяное поле возвышается над поверхностью воды, и на наветренную сторону надводной части торца поля действует скоростной напор ветра, который превышает трение на сравнительно небольшой поверхности ледяного поля, в то время как у сплошного ледяного покрова существует только воздействие трения воздушной массы. Результаты расчетов также показывают, что скорость дрейфа ледяного поля уменьшается с увеличением толщины льда. Это связано с увеличением вклада лобового сопротивления погруженной части ледяного поля (8) в общее сопротивление ветровому дрейфу ледяного поля.

3. ОЦЕНКА ОБЪЕМА ОБЛОМКОВ ЛЬДА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ

Величина кинетической энергии движущегося тела определяется его массой и скоростью. Для дрейфующего ледяного поля толщиной h_{ice} с характерным размером L_f кинетическая энергия является функцией скорости ветра w и определяется выражением

$$E_{kif}(w) = \frac{1}{2} \gamma_{ice} h_{ice} S_{if} \left[v(w, h_{ice}, L_f) \right]^2. \quad (12)$$

Это выражение показывает, что кинетическая энергия ледяного поля увеличивается с ростом его толщины и площади и возрастает пропорционально квадрату скорости дрейфа. В то же время сама скорость дрейфа ледяного поля зависит от его размеров и толщины, поэтому для оценки характера этой зависимости выполнено специальное моделирование с вариацией входящих в выражение (12) параметров.

Результаты расчетов по формуле (12) оказалось возможным аппроксимировать степенными зависимостями, которые имеют следующую форму:

$$\begin{aligned} E_{kif}(w) &\propto w^{1.97}, \quad E_{kif}(h_{ice}) \propto h_{ice}^{0.748}, \\ E_{kif}(L_f) &\propto L_f^{2.18}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, проявляется многофакторная зависимость кинетической энергии дрейфующего ледяного поля от его размеров и скорости ветра. Полученные в результате моделирования зависимости (13) позволяют понять характер изменения кинетической энергии дрейфующего ледяного поля при вариации его размеров и скорости ветра.

Морской лед – специфичное твердое тело, которое обладает свойствами хрупкого разрушения и вязкоупругой деформации при ударной нагрузке [15, 17]. Сравнение затрат кинетической энергии ледяного поля на проявление каждого из этих свойств не представляется возможным, так как их соотношение зависит от реальной формы ледяного поля, ориентации его в пространстве относительно препятствия и других факторов. Поэтому, ориентируясь на практические приложения, целесообразно выполнить “оценку сверху”, полагая, что вся кинетическая энергия дрейфующего ледяного поля при ударе о препятствие затрачивается на хрупкое разрушение части ледяного поля. В результате разрушения образуются обломки – мелкие куски льда, форма и количество которых не рассматривается.

Соотношение энергии удара и объема образовавшихся осколков характеризуют ударной энергией разрушения. По имеющимся результатам измерений [13, 14, 25], величина удельной энергии разрушения морского льда лежит в относительно широком диапазоне: $e_F = 0.34 \div 4.5$ кДж/м³. Эти

результаты получены при испытаниях образцов льда с соленостью от 0 до 6.0‰ и температурой от –1°C до –60°C.

Полученное решение для величины кинетической энергии дрейфующего ледяного поля (12) позволяет оценить объем разрушения льда при ударе поля о неподвижное препятствие, приравняв кинетическую энергию ледяного поля E_{kif} к энергии, затраченной на образование объема Q_{if} обломков льда. Полученный результат следует рассматривать как оценку “сверху”, так как часть кинетической энергии ледяного поля в реальных условиях будет истрачена на эффекты, которые сопутствуют соударению реальных твердых тел и не рассматриваются в данном исследовании. Для оценки объема обломков ледяного поля Q_{if} получена следующая формула:

$$Q_{if}(w) = \frac{\gamma_{ice}}{2e_F} h_{ice} L_f^2 \left[v(w, h_{ice}, L_f) \right]^2. \quad (14)$$

С использованием этой формулы выполнены оценки объема разрушения льда для некоторой средней величины удельной энергии разрушения льда, например, $e_F = 1.5$ кДж/м³. На рис. 5 представлены результаты расчетов: зависимость объема обломков льда от скорости ветра для ледяного поля с характерным размером $L_f = 100$ м для нескольких толщин льда, которые свойственны однолетним морским льдам в арктических акваториях.

Эти материалы показывают, что при разрушении дрейфующего ледяного поля при столкновении с неподвижным препятствием могут образоваться большие (сотни и тысячи кубометров) объемы обломков льда, которые сформируют нагромождение значительных размеров, увеличивающееся с ростом толщины льда в соответствии с зависимостью (14). Однако эти объемы не столь велики в сравнении с объемом самого ледяного

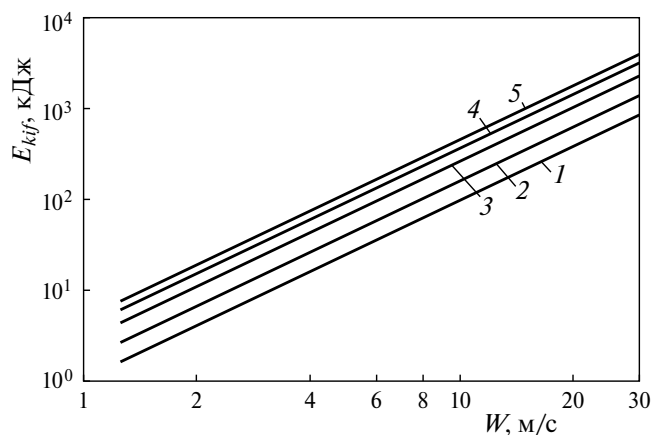


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии дрейфующего ледяного поля от скорости ветра при различной толщине льда. Обозначения 1–5 – как на рис. 3.

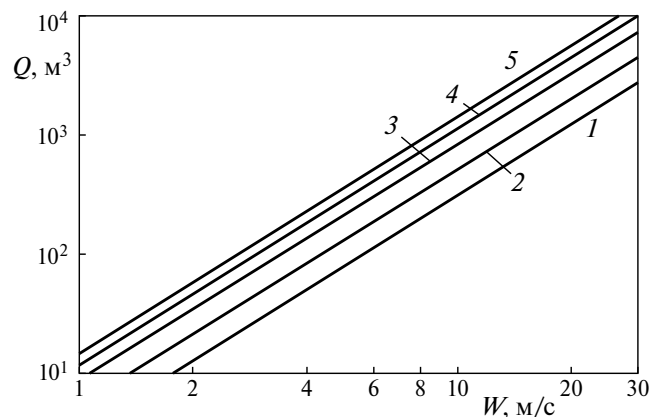


Рис. 5. Зависимость объема обломков льда, образовавшихся при столкновении ледяного поля с препятствием, от скорости ветра для различных толщин льда. Обозначения 1–5 – как на рис. 3.

поля. Согласно рис. 5, для скоростей ветра в диапазоне 10–15 м/с относительный объем обломков льда при разрушении ледяного поля размером $L_f = 100$ м (площадь $S_{lf} = 10000$ м²) не превышает 5% объема ледяного поля до столкновения. С ростом размеров ледяных полей становится неадекватным допущение об отсутствии их взаимодействия с другими ледяными полями, а также об однородности полей скорости ветра и дрейфового течения. Поэтому пределы применимости результатов оценок в отношении размеров ледяных полей требуют дополнительных исследований и уточнения.

4. НАГРОМОЖДЕНИЕ ОБЛОМКОВ ЛЬДА ПЕРЕД ПРЕПЯТСТВИЕМ В НЕОГРАНИЧИВАЕМОЙ ПО ГЛУБИНЕ АКВАТОРИИ

Изложенные выше результаты дают возможность оценить размеры нагромождения льда вблизи борта стационарной платформы. В качестве исходного предполагается, что именно столкновение некоторого конкретного дрейфующего ледяного поля с бортом платформы является естественным и единственным механизмом образования нагромождения и весь объем обломков льда, образовавшихся после столкновения, формирует рассматриваемое нагромождение. Именно этот процесс рассматривался в качестве основного в исследованиях нагромождений льда на платформах и других шельфовых сооружениях [23, 24].

В качестве исходного допущения предполагается считать, что обломки льда, образовавшиеся в результате столкновения дрейфующего ледяного поля с препятствием, формируют протяженную насыпь, подобную по форме своего поперечного сечения торосам в покрытых льдом акваториях. Формы надводной и подводной частей нагромождения, так же как тороса, характеризуются углами склона паруса и киля, которые, в свою очередь, зависят от размеров и веса обломков льда. Этот процесс подобен формированию склонов насыпей из обломков горных пород [9]. Данное допущение позволяет применить результаты исследований формы торосов из обломков льда [21, 23, 24, 26] для оценки размеров нагромождения обломков льда перед препятствием по прогнозируемому их суммарному объему.

Следующие основные характеристики формы торосов сочтено целесообразным принять для последующего анализа [27]:

- отношение высоты паруса H_s к глубине киля H_k равно $H_k/H_s = \beta_1 = 4.4$;

- отношение ширины киля W_k к высоте паруса H_s равно $W_k/H_s = \beta_3 = 15.1$;
- угол склона паруса $\alpha_s = 20.7^\circ$ и угол склона киля $\alpha_k = 26.6^\circ$.

На рис. 6 показана принятая на основе указанных выше допущений схема и геометрические размеры поперечного сечения нагромождения обломков льда перед стеной неподвижного препятствия, подобное половине поперечного сечения протяженного тороса, заимствованной из [27]. Принятая схема нагромождения обломков льда дает возможность представить его поперечное сечение в виде суммы паруса в форме прямоугольного треугольника и киля в форме трапеции с двумя прямыми углами.

Геометрических параметров поперечного сечения тороса, приведенных выше, достаточно, чтобы определить однозначно площадь поперечного сечения A_{ip} нагромождения обломков льда перед стеной препятствия, используя только единственный параметр: высоту паруса H_s . Соответственно, высоту паруса H_s можно представить в зависимости от площади поперечного сечения нагромождения A_{ip} . Соответствующая формула имеет следующий вид:

$$H_s = \sqrt{\frac{2 A_{ip}}{\text{Ctg}(\alpha_s) + \beta_1 [\beta_3 - \beta_1 \text{Ctg}(\alpha_k)]}}. \quad (15)$$

Чтобы оценить возвышение нагромождения относительно поверхности льда H_{sel} , необходимо учесть толщину ледяного поля h_{ice} и плотность морского льда γ_{ice} . В результате получается следующее выражение:

$$H_{sel} = \sqrt{\frac{2 A_{ip}}{\text{Ctg}(\alpha_s) + \beta_1 [\beta_3 - \beta_1 \text{Ctg}(\alpha_k)]}} - (1 - \gamma_{ice}) h_{ice}. \quad (16)$$

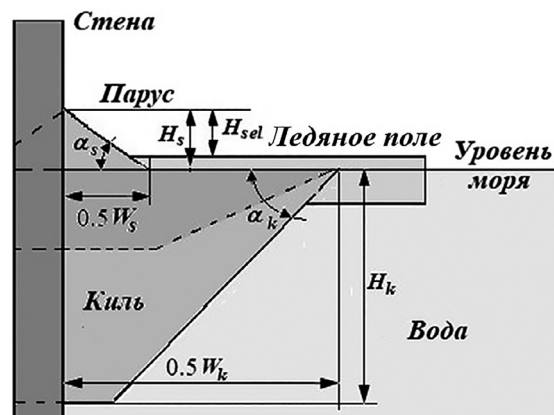


Рис 6. Схема нагромождения обломков льда перед препятствием как половина поперечного сечения тороса (гряды торосов).

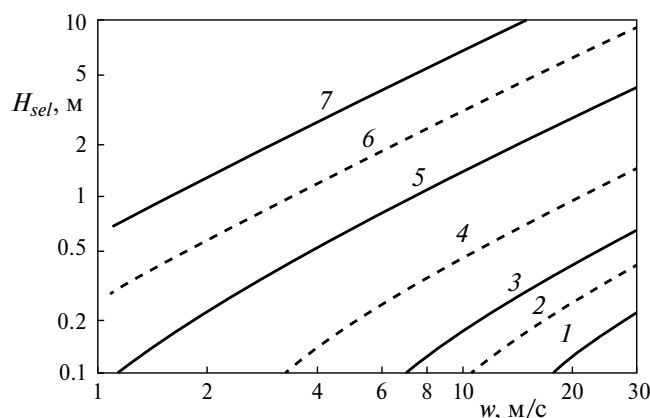


Рис. 7. Зависимость возвышения нагромождения льда перед бортом платформы от скорости ветра и размера ледяного поля с толщиной $h_{ice} = 1$ м. Обозначения: 1 – $L_f = 20$ м, 2 – $L_f = 50$ м, 3 – $L_f = 100$ м, 4 – $L_f = 200$ м, 5 – $L_f = 500$ м, 6 – $L_f = 1000$ м, 7 – $L_f = 2000$ м.

Площадь поперечного сечения нагромождения льда A_{ip} можно представить как объем обломков в следующих двух вариантах:

а) объем обломков льда на единицу длины нагромождения, если ширина ледяного поля, сталкивающегося с препятствием, меньше, чем длина борта платформы L_{pl} , или

б) объем обломков льда на единицу длины платформы, если ширина дрейфующего ледяного поля больше, чем длина борта платформы, и разрушается только часть ледяного поля:

$$A_{ip} = \frac{Q}{L_f}, \text{ при } L_f \leq L_{pl}; \quad A_{ip} = \frac{Q}{L_{pl}}, \text{ при } L_f > L_{pl}. \quad (17)$$

Основываясь на этом представлении, выполнены оценки высоты нагромождения льда вблизи борта платформы Приразломная в Печорском море в зависимости от размеров ледяных полей и скорости ветра с использованием формул (16) и (17). Результаты расчетов представлены на рис. 7.

Оценки возможных возвышений нагромождения льда вблизи борта платформы, выполненные по представленной модели, оказываются близкими к наблюдавшимся в реальных условиях. На фото на рис. 8 показана платформа Приразломная и рабочее судно рядом с нагромождением льда, заимствованное из общедоступного источника [10] (без указания авторства и предыстории образования нагромождения).

Судя по этому фотоснимку, высота нагромождения льда соизмерима с возвышением форштевня и палубы бака рабочего судна. То есть высота нагромождения льда может достигать примерно $H_{sel} \cong 3 \div 6$ м. Результаты моделирования, представленные на рис. 7, дают возможность предполагать, что нагромождения льда такой высоты могут быть результатом столкновения с платформой ледяного поля с размером $L_f > 500$ м в плане и толщиной $h_{ice} = 1$ м, которое дрейфовало под действием ветра со скоростью $w > 20$ м/с. Эти параметры не противоречат данным о ледовых условиях в Печорском море [2].



Рис. 8. Платформа Приразломная, общедоступное фото [10].

5. НАГРОМОЖДЕНИЕ ОБЛОМКОВ ЛЬДА ПЕРЕД ПРОТЯЖЕННЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ

Эта проблема актуальна для различного рода береговых сооружений, расположенных на малых глубинах. Для решения ее целесообразно использовать тот же метод, который использовался ранее: сравнение с подобным по механизму возникновения и достаточно хорошо изученным естественным природным процессом и аналогичным по внешним проявлениям его последствий. В качестве такого процесса целесообразно рассмотреть образование стамух: нагромождений обломков льда в прибрежных акваториях. Это явление связывают с ветровым дрейфом и переносом приливным и другими течениями отдельных льдин и торосов на мелководье, где они останавливаются, наслаиваются под действием приливов, смерзаются и образуют нагромождения, достигая значительных размеров [7].

Стамухи являются характерным ледяным образованием для мелководных морей Арктики и для Охотского моря. Анализ геометрических размеров стамух и их соотношения на основе опубликованных различными авторами материалов приведен в [20]. Эти материалы, а также представление о том, что угол наклона склона надледной части стамухи определяется теми же процессами, что у обычного тороса и у насыпи обломков горных пород, дают возможность оценить размеры нагромождения обломков льда перед неподвижным сооружением на мелководье.

Результаты статистического анализа размеров стамух [20] определяют следующие средние величины размеров поперечного сечения стамух:

- средняя высота возвышающейся над льдом части стамухи $S_{gh} = 7.5$ м;
- средняя ширина поперечного сечения надводной части стамухи $B_{gh} = 36$ м;
- определяемый этими размерами угол склона стамухи $\alpha_{gh} = 22.62^\circ$.

Следует отметить, что угол склона надводной части стамухи ($\alpha_{gh} = 22.62^\circ$) близок к углу склона паруса тороса ($\alpha_s = 20.7^\circ$), хотя и превышает его, что можно связать с различием в размерах обломков льда, которые образуются при столкновении льдин (торосов) и столкновении с другим торосом в составе стамухи.

Геометрия подводной части стамухи определяется глубиной акватории, и склоновые процессы играют ограниченную роль. Поэтому можно считать, что обломки льда, попадающие под лед, формируют основание нагромождения льда,

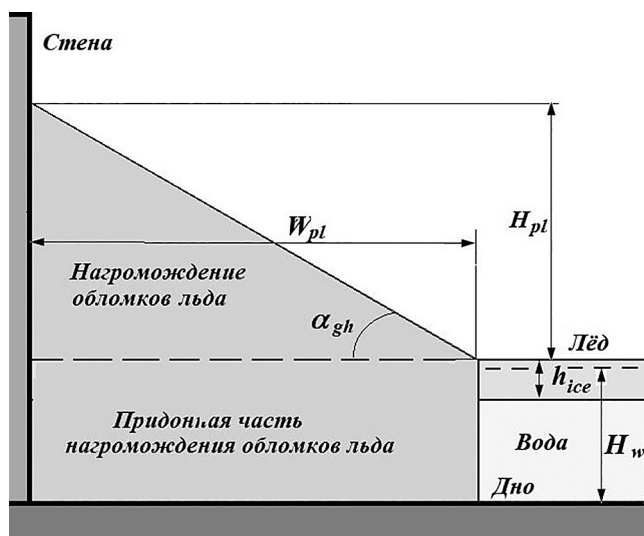


Рис. 9. Схема нагромождения обломков льда перед препятствием на мелководье как половина поперечного сечения стамухи.

имеющее в поперечном сечении форму, близкую к прямоугольнику [12]. Принятая для дальнейшего анализа схема поперечного сечения нагромождения льда на мелководье (как половина поперечного сечения стамухи) представлена на рис. 9.

Для принятой схемы (геометрии) поперечного сечения нагромождения льда на мелководной акватории оказывается возможным представить высоту нагромождения H_{pls} в виде зависимости от площади его поперечного сечения A_{pls} и угла склона надводной части нагромождения α_{gh} , а также от глубины акватории H_w и толщины льда h_{ice} в следующей форме:

$$H_{pls} = \left[\sqrt{1 + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha_{gh} A_{ips}}{[H_w + (\gamma_w - \gamma_{ice}) h_{ice}]^2}} - 1 \right] \times [H_w + (\gamma_w - \gamma_{ice}) h_{ice}]. \quad (18)$$

Береговые сооружения имеют в большинстве случаев большую протяженность (набережная, волнозащитный мол), поэтому размеры ледяного поля во многих случаях могут быть существенно меньше протяженности преграды и площадь поперечного сечения нагромождения определяется объемом обломков льда $Q_{if}(5)$ и характерным размером ледяного поля L_f :

$$A_{ips} = \frac{\gamma_{ice}}{2e_F} h_{ice} L_f \left[v(w, h_{ice}, L_f) \right]^2. \quad (19)$$

В результате для высоты нагромождения льда перед преградой на мелководье получается следующая зависимость:

$$H_{pls} = \left[\sqrt{1 + \frac{\gamma_{ice} \operatorname{tg} \alpha_{gh} h_{ice} L_f \left[v(w, h_{ice}, L_f) \right]^2}{e_F \left[H_w + (\gamma_w - \gamma_{ice}) h_{ice} \right]^2}} - 1 \right] \times \\ \times \left[H_w + (\gamma_w - \gamma_{ice}) h_{ice} \right]. \quad (20)$$

Полученное выражение показывает, что, в отличие от глубоководной акватории, на мелководье высота нагромождения льда оказывается зависящей от глубины акватории H_w . На рис. 10 представлены результаты расчетов по этой формуле: зависимость высоты нагромождения обломков льда от глубины акватории после столкновения с препятствием ледяного поля с характерным размером $L_f = 200$ м и толщиной $h_{ice} = 1$ м при различных скоростях ветра: от 10 м/с до 30 м/с.

Результаты моделирования: высоты нагромождений льда на мелководье соответствуют реально наблюдаемым величинам [1]. Поэтому полученное решение можно считать адекватным описанием исследуемого процесса.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Заключительным результатом выполненных исследований является оценка эффектов, появляющихся при столкновении дрейфующих льдов с неподвижными препятствиями, которыми могут быть стационарные платформы и береговые сооружения. Полученное решение учитывает большинство факторов, которые влияют на размеры нагромождений льда перед стационарными гравитационными платформами и береговыми сооружениями, в том числе:

- размеры и толщину дрейфующих ледяных полей, а также удельную энергию разрушения льда;
- скорость ветра, приводящего ледяное поле в движение;
- глубину акватории.

Оценка размеров нагромождения обломков льда построена на предположении, что их геометрическая форма подобна форме торосов и стамух. Это предположение по своей сути не должно вызывать сомнений в его адекватности, так как процессы разрушения дрейфующего ледяного поля при столкновении с припаем и при столкновении с преградой подобны. Однако на процесс формирования нагромождения и его размеры может оказывать влияние форма и размеры самого препятствия. Поэтому представляют интерес полевые исследования форм и размеров нагромождений у платформ и береговых сооружений, а также контроль размеров и скорости дрейфа

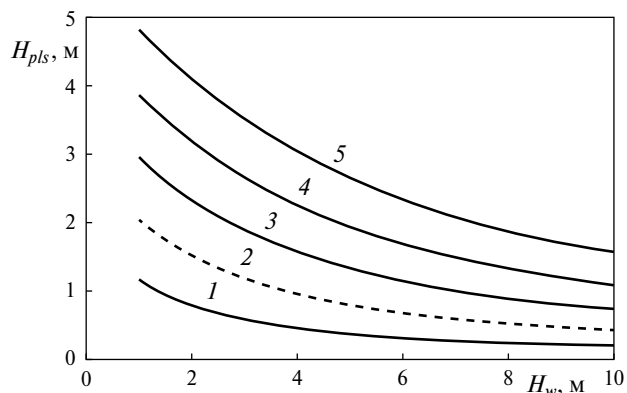


Рис. 10. Зависимость высоты нагромождения обломков льда перед препятствием на мелководье от глубины акватории при различных скоростях ветра. Обозначения: 1 – $w = 10$ м/с, 2 – $w = 15$ м/с, 3 – $w = 20$ м/с, 4 – $w = 25$ м/с, 5 – $w = 30$ м/с.

сталкивающихся с сооружениями ледяных полей. Полученные результаты предоставляют возможность проверить и уточнить представленные в статье модели.

С другой стороны, результаты моделирования дрейфа ледяного поля свидетельствуют о том, что скорость поверхностного ветрового течения соизмерима со скоростью ветрового дрейфа ледяного поля относительно неподвижной водной массы на свободной ото льда части акватории. Поэтому необходимо специальное исследование влияния на дрейф ледяного поля ветрового течения, направление которого отличается от направления ветра и зависит от глубины акватории. Учет ветрового течения в модели ветрового дрейфа ледяного поля приведет к увеличению оцениваемой скорости дрейфа относительно неподвижной системы координат, к увеличению кинетической энергии ледяного поля, росту потенциального объема обломков льда и соответствующему увеличению оцениваемого объема нагромождения перед неподвижным препятствием.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании методы гидроаэродинамики и теории корабля применены для моделирования динамики морского льда. Основой этого подхода явилось предположение о том, что движение единичного объекта – ледяного поля по водной поверхности допустимо описать методами, которые эффективно применяются для оценки ходкости проектируемых судов. В результате построены модели, которые позволяют прогнозировать размеры нагромождений льда перед стационарными платформами и береговыми сооружениями, основываясь на сведениях о ледовых и метеорологических условиях в рассматриваемых

мой акватории. Созданные модели в дальнейшем предполагается уточнить на основе специально-го контроля форм и размеров реальных нагромождений льда.

Задачами дальнейших исследований рассматриваемой проблемы могут являться моделирование динамики дрейфа ледяных полей (поскольку для достижения установившейся скорости ветрового дрейфа может потребоваться время и дистанция, превышающая размеры акватории), а также учет вызываемого ветром дрейфового течения, направление которого отличается от направления вызывающего течение ветра. Кроме того, на дрейф ледяных полей оказывают влияние крупномасштабные океанские и приливные течения, которые могут вызвать столкновение ледяных полей с преградой и в отсутствие ветра.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и Науки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению “Передовые цифровые технологии” СПбГМТУ (соглашение от 20.04.2022 № 075-15-2022-312).

Конфликт интересов. Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев В.Н., Сурков Г.А., Трусков П.А. Торосы и стамухи Охотского моря. СПб: Пресс-Погода, 1997. 197 с.
2. Бушуев А.В., Волков Н.А., Лоцилов В.С. Атлас ледовых образований. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 140 с.
3. Войткунский Я.И. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
4. Гончаров В.К. Ветровой дрейф и разрушение ледового поля // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ). 2022. Вып. 4(4). С. 14–26.
5. Гончаров В.К., Пяткин В.А. Исследование взаимодействия ледовых полей с неподвижной преградой // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 3. № 1. С. 66–71. Doi.org 10.37220/MIT.2020.47.1.039.
6. Доронин Ю.П. Физика океана. СПб: Изд. РГГМУ, 2000. 340 с.
7. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
8. Жуков Л.А. Общая океанология. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 376 с.
9. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология (Учебное пособие) М.: Высшая школа, 1979. 287 с.
10. Объединенная судостроительная корпорация. Пресс-центр. Новости, 4 марта 2022 г. <https://www.aosk.ru/press-center/news/na-platforme-prirazlomnaya-dobyto-bolee-19-mln-tonn-nefti/>.
11. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. Общий курс. М.: Наука, 1964. 816 с.
12. Харитонов В.В., Бородин В.А. Методика исследования стамух // Материалы докладов XIII Общероссийской научно-практической конференции и выставки “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”, 2017. С. 216–223.
13. Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А., Курдюмов В.А. Определение удельной энергии разрушения и контактных давлений при ударе твердого тела о лед // Труды АНИИ. 1975. Т. 326. С. 210–218.
14. Цуприк В.Г. Теоретические исследования удельной энергии механического разрушения морского льда // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2013. Т. 13. № 2. С. 119–125.
15. Bridges R., Riska K., Hopkins M., Wei Y. Ice interaction process during ice encroachment // Marine Structures. 2019. V. 67. 102629. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.05.007>
16. Dawson T.H. Offshore structural engineering. Leningrad: Sudostroenie. 1986. 288 p.
17. Dong J., Li Zh., Lu P. et al. Design ice loads for piles subjected to ice impact // Cold Regions Science and Technology. 2012. V. 71. P. 34–43.
18. Goncharov V.K. Wind drift and breakdown of the ice field // 26th IAHR International Symposium on Ice (IAHR-22). Montreal, Canada. 2022. Paper 79. 11 p.
19. Goncharov V.K. Wind drift and pile up of the ice field // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. № 6. 13 p. <https://doi.org/10.3390/jmse11061227>
20. Goncharov V.K., Klementieva N. Yu., Li Z. et al. Effective forces on the grounded hummock and piled ice // Proceeding of the 19th International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Condition “Recent Development of Offshore Engineering in Cold Regions”, POAC’2007. China. 2007. V. 2. P. 735–746.
21. Hoyland K.V. Ice ridge characteristics and engineering concerns regarding ice ridges // Cold Region Science and Marine Technology (EOLSS). 2012. V. 1. Chapter 29. 19 p.
22. Leppäranta M. The drift of Sea Ice. Springer-Berlin, Heidelberg. Germany. 2011. 350 p.
23. Marchenko A. Modelling of ice piling up near offshore structures // Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice. Finland. 2010. 14 p.
24. Patil A., Sand B., Fransson L., Daiyan H. Constitutive models for sea ice rubble in first year ridges: a literature review // Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice. Dalian, China. 2012. P. 623–638.
25. Peyton H.R. Sea ice strength // Report NNR307–247. Geophysical Institute. University of Alaska. 1966. 273 p.

26. *Sand B., Bonath V., Sudom D., Petrich C.* Three year of measurements of the first-year ridges in the Barents Sea and Fram Strait // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'15. Norway. 2015. 11 p. <https://www.poac.com/PapersOnline.html732-742>
27. *Sudom D., Timco G., Sand B., Fransson L.* Analysis of first-year and old ice ridge characteristics // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'2011. Canada. 2011. V. 1. P. 732-742. <https://doi.org/10.4224/23004497>

WIND DRIFT, BREAKDOWN AND PILLING UP OF THE ICE FIELD FRAGMENTS

V. K. Goncharov*

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

** e-mail: vkgonch@mail.ru*

The article contains mathematical model of the wind drift of the ice field, which allows to estimate the drift speed depending on the wind speed and the size of the ice field, as well as the kinetic energy of the ice field that will be released after it collide with a fixed obstacle, and cause brittle fracture and the formation of fragments that forms piles in front of stationary offshore structures. The basis for the study was the assumption that the effect of wind and water mass on the ice field can be described by methods used in aerodynamics and theory of ship. The model of the process of ice pile formation and the estimation of its dimensions were based on the assumption that all kinetic energy of the ice field is spent on its brittle breakdown, and the formation of the ice fragments pile occurs according to the same laws as in natural accumulations of ice fragments: hummock ridges and stamukhs. The created model and results of computer modelling can be applied for practical assessments and forecast of the dimensions of the ice computer simulation made it possible to relate the size of the pile of ice fragments near stationary platforms and terminals in the Arctic seas and other ice infested seas.

Keywords: sea ice, drift, wind, kinetic energy, breakdown, ice fragments, pilling-up