

УДК 656.61.034

**PERSPECTIVE METHODS OF ICE PILOTAGE ON CANALS AND DITCHES OF AZOV SEA IN WINTER PERIOD****ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЛЕДОВОЙ ПРОВОДКИ СУДОВ НА КАНАЛАХ И ФАРВАТЕРАХ АЗОВСКОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД***A. Lysyi, seniorlecturer**А.А. Лысый, старший преподаватель**AMI Odessa National Maritime Academy, Ukraine**АМИ Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

The principle of guaranteed safe operation of a caravan on icecanals and ice ditches on the non-Arctic seas is represented in the article. Rhythm and freight security at the lowest- inevitable cost of energy resource ships of the convoy are formed on the basis of the rules of ice pilotage conditions. Proposed advanced methods for sustainable management of icebreakers when laying on ice roads.

**Keywords:** icebreaker, icewiring channels, freight, Sea of Azov.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Проблема круглогодичной эффективной работы морских и речных портов Украины неразрывно связана с пропускной способностью морских магистралей страны особенно в период наступления ледовой навигации.

С наступлением осенне-зимне-весеннего периода количество судозаходов, например, в Мариупольский морской торговый порт, снижается в 5 раз (с 9-ти до менее 2-х) [1]. Наблюдается острая нехватка ледоколов и судов ледового класса, опасное накопление в северно-восточной части Черного моря на входе в Керченский пролив более сотни судов на якорных стоянках и вблизи них. Такие обстоятельства создают серьезную угрозу для судоходства связанную с гибелью судов и людей (ноябрь 2007г.) [2].

**Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

Анализ результатов предыдущих собственных исследований [3,4,5] показал, что в национальной морской транспортной системе «порты – каналы (магистралей) – суда – море (климат)», объединенной показателем пропускной способности морских каналов и фарватеров, не накоплен практический опыт работы судов в ледовых условиях о чем свидетельствует содержание руководящих документов (РД) по нормам проектирования морских каналов [6] и рекоменда-

циям по назначению оптимального режима проводки судов на морских каналах [7], в которых нет даже упоминаний о ледовых проводках.

Единственным документом, в котором в обобщенной форме представлены результаты опыта морской практики, являются правила ледовой проводки – судов [8], распространяющиеся на торговые суда при их плавании в ледовых условиях в территориальном море и на внутренних водных путях Украины. К сожалению, из-за сложности и опасности проведения ледовых операций, движение ледовых караванов до сих пор не регламентировано, что практически сводит на нет возможность какого-либо плавания грузопотоков морских и речных портов в ледовых условиях. Подтверждением высказанному является и диссертационное исследование К.Е. Сазонова [9] по созданию теории ледового корабля, которая сформировалась только в начале XXI-го века.

### **Формулирование целей статьи (постановка задачи)**

Целью настоящего исследования является попытка регламентации работы флота на морских каналах и фарватерах путем управляемого воздействия на эффективность работы судов и безопасность мореплавания с использованием современных подходов к проводке караванов и методов управления судами ледового класса под проводкой ледоколов.

Основная идея исследования состоит в гармонизации процессов вывоза разнообразных грузов из Донецкого региона и прилегающих к нему территорий, а также сквозных транспортных перевозок на Восток Украины по морскому пути от Керченского пролива до порта Мариуполь в условиях льдообразования на каналах и фарватерах.

Суть гармонизации заключается в стабилизации грузопотоков на определенном заданном уровне при условии гарантированно безопасного судовождения на каналах и фарватерах при ледовых проводках.

Главной задачей исследования стало обоснование общего подхода к гарантированному безопасному управлению ледовыми караванами основанного на системных принципах информативности, определенности и ответственности.

Системное решение главной задачи научного исследования потребовало перехода от эвристических и логистических методов стохастического характера к графоаналитическим и экспериментальным методам детерминистского характера для уточнения свойств, связей и отношений в рассматриваемой системе «порты – каналы – суда – море».

Во-первых, это касалось обеспечения навигационной безопасности судоходства в условиях максимизации пропускной способности судов на каналах и фарватерах.

Во-вторых, установление вида и характера ледовых условий на каналах и фарватерах, которые могут вызвать опасную для корпуса судна нагрузку.

В-третьих, установление необходимой и достаточной ледопроеходимости ледоколов для выполнения ледовых операций при проводке караванов.

В четвертых, выбор безопасных методов управления караваном судов при ледовых проводках.

Эффективность работы судов можно повысить в результате уменьшения расходной и/или увеличения доходной составляющей. Увеличение доходной составляющей в любых климатических условиях можно достичь за счет увеличения водоизмещения судна  $D_{W(\max)}$  до разумных пределов. При этом минимально неизбежная работа по доставке грузов на расстояние  $L$  составит  $A_{\min} = D_{W(\max)}L$ . В свою очередь, на перемещение судна с грузом расходуется энергия (работа) равная мощности энергетической установки умноженной на период рейса  $A_C = N_C T$ . Эффективность рейса составит:  $\varepsilon_p = \frac{A}{A_C} = \frac{D_{W(\max)}}{N_C} v_p$ , где  $v_p$  – средняя скорость судна в рейсе.

Для отдельного типа судов отношение  $D_W/N_C$  – величина известная и относительно постоянная, величина которой для ледоколов меньше единицы. Поэтому  $\varepsilon_p$  в первом приближении линейно зависит от  $v_p$ . В денежном выражении  $\varepsilon_p = f_d D_W v_p / N_C$ ,  $f_d$  – тарифная ставка на перевозку единицы груза  $D_W$ . Из этого следует, что с увеличением уровня тарифных ставок и скорости доставки грузов имеется возможность повысить эффективность перевозок.

### **Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

Повышение эффективности работы судов на каналах и фарватерах следует начинать с провозной способности судна  $D_W/N_C$ , т.е. от возможности продвижения на канале максимального дедвейта, величина которого зависит не только от осадки [6], но и от ширины полосы движения, а также видов предстоящих маневров.

Следует исходить из того, что при оценке возможности прохода судна с максимальными размерами по каналу заданной ширины ограничиваются либо погодные условия, либо предусматриваются меры по повышению устойчивости его движения для снижения дрейфа (рыскливости) в виде: буксирной или ледовой проводки; использования подруливающих средств и поворотных рулевых колонок; повышения точности определения места глазомерными или инструментальными способами.

В настоящее время для этих целей используются два метода определения показателя навигационной безопасности: стохастический и детерминистский [10].

Стохастический метод определяется вероятностью отсутствия навигационного события:  $\Phi_{(y)} = 0,5(1 + P_n)$ , где  $P_n$  – распределение по Лапласу  $\left[ P_n = 1 - \exp\left(-y\sqrt{0,5\pi}\right), y = D/m_D \right]$ ;  $m_D$  – среднеквадратическая ошибка, с которой может быть известным значение расстояния  $D$ . Касаясь габаритов судна и канала следует отметить, что  $D = 0,5(B_k - B_c)$ , где  $B_k, B_c$  – ширина канала и движущегося судна. Безопасной является величина  $\Phi_{(y)} \in [0,97; 0,99]$ .

С точки зрения управляемости эффективность управления судном зависит от угла его рыскания  $\alpha$  относительно оси канала:  $\varepsilon_\alpha = 3\cos\alpha / (4 - \cos\alpha)$ ; [11]. Этот метод оценки относится к детерминистским, использующим известную формулу Гюйгенса относительно соотношения длин дуги и хорды сегмента.

При  $\varepsilon_\alpha = const$  и  $\alpha \leq 0,5\pi$ :  $\alpha = \arccos[4\varepsilon_\alpha/(3 + \varepsilon_\alpha)]$ . Если допустить равнозначность приведенных методов, т.е.  $\Phi(y) \approx \varepsilon_\alpha$ , то можно определить требуемые параметры определения места, используя выражение для определения  $m_D = -\sqrt{0,5\pi D}/[\ln 2 + \ln(1 - \Phi(y))]$  или  $m_D = -0,63(B_K - B_C)/[0,693 + \ln(1 - \Phi(y))]$ , а при заданной величине  $m_D$  определить максимальную ширину судна  $B_{C(max)} = B_K + 1,6m_D[0,693 + \ln(1 - \Phi(y))]$ . Так при  $\Phi(y) = \varepsilon_\alpha = 0,99$  и  $m_D = 10$  м:  $B_{C(max)} = B_K - 62,6$ ;  $\alpha = 7^\circ$ , а при  $\Phi(y) = \varepsilon_\alpha = 0,97$  и  $m_D = 10$  м:  $B_{C(max)} = B_K - 45,0$ ;  $\alpha \approx 12^\circ$ . Последнее значение угла  $\alpha$  является минимально допустимым при управлении судами каравана.

Повышение величины  $D_{w(max)}$  возможно и за счет увеличения численности эксплуатируемых судов:  $D_{w(max)} = \sum_1^n D_{w(max)i}$ , где  $n$  - численность судов флота, например в караване.

Особенно это важно для ледовых проводок караванов, когда из-за экстремальных погодных условий движение грузопотока на каналах и фарватерах прекращается. Для его возобновления привлекаются дополнительные мощности ледоколов, которые хотя и снижают показатель  $\varepsilon_p$ , увеличивая общую энергооборуженность каравана  $N_K = \sum_1^n N_{c(i)} + \sum_1^m N_{л(j)}$ , где  $N_{c(i)}$  - мощность энергетической установки  $i$ -го судна каравана;  $N_{л(j)}$  - мощность энергетической установки  $j$ -го ледокола проводящего караван;  $m$  - количество ледоколов в караване. Такое вынужденное увеличение  $N_K$  является единственно правильным решением при  $V_p \rightarrow 0$  и  $\alpha \rightarrow 70^\circ$  и выше, первое из которых необходимо повысить до безопасных пределов, а второе - уменьшить до  $\alpha \leq 13^\circ$  с тем, чтобы  $\Phi(y)$  и  $\varepsilon_\alpha$  находились в пределах  $0,97 \div 0,99$  отн. ед.

Обычно при взаимодействии судов со льдом, помимо преодоления сопротивления воды, первые дополнительно затрачивают значительную часть работы на ломку, переворачивание, притапливание и раздвигание льдин, преодоление сопротивления, возникающего при соударении корпуса о льдины, формируя величину сил полного ледового сопротивления.

Суда ледового класса, как правило, работают в разреженных льдах различной степени сплоченности, в то время как ледоколам достается вся гамма тяжелых ледовых нагрузок. В связи с этим представляет интерес оценить возможность использования ледоколов и ледокольных судов в условиях мелководья и подвижности ледовых полей Азовского моря.

Из всего многообразия ледовых условий, которые встречаются в зимний период, к наиболее опасным следует отнести сплошной ледяной покров предельной толщины (перемычки), дрейф льда и торосы. Они характерны для работы ледоколов, а для подавляющего большинства судов, работающих на морских каналах и фарватерах, опасность связанную с повреждением корпуса представляет битый лед сплоченностью 8-10 баллов, остающийся после прохода ледокола, а также сжатие льдами при закрытии ледового канала. По сути, плавание во льдах представляет череду ускорений и замедлений движения судна, продолжительность которых занимает несколько минут.

Собственными наблюдениями установлено, что при низких скоростях хода судна (1,5÷3 узла) лед в большей степени успевает раздвигаться, уплотняться, перераспределяясь по площади канала.

Высоким значениям скорости (5 узлов и выше) свойственно интенсивное деформирование и разрушение льдин в окрестностях судна.

Стабилизация скорости хода судна (2 узла) в мелкобитых льдах сплоченностью до 6 баллов после соударения с льдинами протяженностью 5÷10 м и толщиной 0,5 м происходит за 30÷50 секунд. Такая же картина наблюдается при стабилизации скорости судна в 5÷6 узлов после соударения с льдинами в сплоченных льдах (до 8 баллов). В сильносплоченных льдах (8-10 баллов) соударение с отдельными льдами приводит к неадекватным (хотя и незначительным) ускорениям судна, четырехкратному завышению периода стабилизации хода судна и увеличению его рыскливости до 30÷70°.

Движение судов в ледовых условиях на мелководье является наименее изученным разделом теории ледового корабля [9]. Влияние мелководья сказывается при относительно высоких скоростях движения судов ледокольного типа и зависит от толщины льда:  $V_c \geq 3,05h_{л}^{0,5}$ , где  $h_{л}$  - толщина сплошного льда, м. Торосистые образования мелководья вызывают разрушительные сдвиговые временные нагрузки при взаимодействии ледокола с торосом, в три раза превышающие силы продавливания тороса вниз корпусом ледокола на глубокой воде. Поэтому при эксплуатации ледоколов на мелководье избегают их взаимодействия с торосистыми образованиями, так как их преодоление сопровождается глухими ударами о днище корпуса, повышенной вибрацией и неустойчивостью на курсе, а при выполнении маневра возможна полная остановка ледокола. При вариации типа движительно-рулевого комплекса, установленного на ледоколе с обыкновенным рулем и винто-рулевой колонкой, изменений в качественной картине влияния мелководья на радиус циркуляции не наблюдалось, хотя мелководье экспоненциально уменьшает относительный радиус циркуляции ледокола с увеличением угла перекладки руля от 10 до 40°.

Скорость дрейфа льда и характеристики его неравномерности вдоль ледового канала оставляемого ледоколом определяют вид и интенсивность околки судов каравана лидирующим или вспомогательным ледоколом. Неравномерность дрейфа ледяного поля приводит к тому, что по мере удаления от наветренной стороны борта судов каравана необходимо постоянно разрушать все больший участок ледяного поля, начиная от 10 м по нормали от борта судна. Если существует линейная связь между скоростью в преобладающем направлении движения  $V_c$  и скоростью в поперечном направлении  $V_{c(н)} = k_v V_c$ , то размер зоны, в которой могут находиться опасные ледяные образования подлежащие околке, может быть определен как  $l = L_k + 2V_{c(н)}r/V_c$ , где  $L_k$  - размер окальваемого участка в направлении перпендикулярном направлению дрейфа льда;  $r$  - текущее расстояние от борта судна;  $l$  - поперечный размер окальваемой зоны.

Наиболее эффективной является метод околки судов каравана с наветренной (подвижной) стороны ледового канала на расстоянии не более 10÷20 м от

борта окальваемых судов ледоколом, двигающимся полным передним или задним ходом.

Реальная ледовая ходкость – скорость перемещения в заданном направлении зависит как от характеристик ледяного покрова так и от эффективности управления судном. Рыскливость судна во льдах не устранима даже при очень жестком законе управления, обеспечивающем практически прямолинейность движения на чистой воде.

Результаты наблюдений показывают, что движение судна в регулярных льдах с протяженностью льдин до 5 метров происходит с амплитудой знакопеременного угла дрейфа (рыскливости) пропорциональной росту толщины льда и скорости движения судна. При этом увеличивается и фактор повреждений корпуса – частоты столкновений корпуса судна с отдельными льдинами по приближенной эмпирической зависимости:

$$\mathcal{H} = \begin{cases} 7,7 \cdot 10^{-8} \cdot 755400 h_{л} V_{cc}^{(5,12-2,68h_{л})} & \text{при } 0 < h_{л} \leq 0,5, \\ 2,52 \cdot 10^{-6} \cdot 735 h_{л} V_{cc}^{(5,12-2,68h_{л})} & \text{при } 0,5 < h_{л} \leq 1,0. \end{cases}$$

Важность приведенного выражения заключается в том, что при скоростях соударения судна с льдинами  $V_{cc} \in [1; 3 \text{ м/с}]$  параметр повреждений корпуса  $\mathcal{H}$  возрастает от 0 до 3%. В то время как при  $V_{cc} \in [3,0; 5,5 \text{ м/с}]$  при  $h_{л} \approx 1,0 \text{ м}$   $\mathcal{H}$  возрастает до 14%, а при  $h_{л} \approx 0,5 \text{ м}$  не превышает 6%.

Работа лидирующего ледокола при прокладке канала в ровных льдах различной толщины зависит от характеристики его ледовой ходкости, которая в первом приближении описывается уравнением прямой, проходящей через две точки с координатами  $M_1(V_w; 0)$  и  $M_2(V_k; h_{л(max)})$  – где  $V_w$  – скорость движения судна на чистой воде;  $V_k$  – скорость движения каравана;  $h_{л(max)}$  – максимальная толщина льда, включая максимальную толщину ледовых перемычек, а  $V_{л} = V_w - (V_w - V_k)h_{л}/h_{л(max)}$ .

Ледовые перемычки ледокол преодолевает набегам, если их толщина близка к предельной  $[h_{л(max)}]$  ледопроеходимости или превышает ее. В этом случае зависимость скорости движения ледокола от толщины льда может быть представлена следующим выражением:

$$V_{л} = V_{л}^* - (V_{л}^* - V_k)(h_{л} - h_{лп})/(h_{л(max)} - h_{лп}),$$

где  $V_{л}^* = V_w - (V_w - V_k)h_{лп}/h_{л(max)}$ , а  $h_{лп}$  – толщина льда в перемычке.

Преодоление торосистых гряд осуществляет лидирующий ледокол, работая набегам. При работе в таком режиме ледокол разгоняется до  $V_{л}^*$  или максимально безопасной допустимой (паспортной) скорости и врезается в торосистое образование. Кинетическая энергия запасенная ледоколом, а также тяга движительного комплекса теряется на внедрение корпуса в торос. Когда запас кинетической энергии будет израсходован полностью, цикл движения повторяется: ледокол отходит по своему каналу назад и ударяет о торос. Такой метод преодоления торосов и ледовых перемычек известен под названием «ёлочка» [3]. Число необходимых маневров (циклов) для создания прохода каравану за-

висит от размеров торосистой гряды, а движение ледокола набегамии эффективно при форсировании одиночных гряд торосов при проводке судов на фарватерах открытого моря. В специальной литературе излагается новый метод форсировки торосов на припас разработанный финскими специалистами для ледокольных судов, оборудованных ВРК типа «Азипод». Он заключается в том, что судно (ледокол) форсирует торосы задним ходом, фрезеруя и отбрасывая лед, составляющий киль тороса, используя для этого ВРК. В практическом мореплавании ВРК используются и для расширения ледового канала.

**Обсуждение.** Основой безопасного управления ледовыми караванами должен быть примат правил ледового плавания [8].

Регламентация работы морского флота на морских каналах и фарватерах в ледовых условиях возможна за счет увеличения тоннажа и интенсивности движения ледовых караванов с безопасной навигационной скоростью около 2-х узлов.

Основными технологическими операциями при проводке караванов являются прокладка ледового канала, определяющего полосу движения судов, с использованием методов лидирования и непрерывной околки судов каравана с наветренной стороны движения.

Суда, ширина которых больше ширины лидирующего ледокола, должны обладать энерговооруженностью  $N_c/D_w \in [1,1; 1,6 \text{ кВт/т}]$  и быть способными безопасно притапливать и раздвигать льдины после прорезки ледоколом ледяного канала, а поэтому они должны располагаться за ледоколом впереди каравана.

Системный подход к проблеме обеспечения пропускной способности морских портов Украины и безопасности ледового плавания судов в неарктических водах Черного и Азовского морей, основанным на принципах информативности, определенности и ответственности при осуществлении ледовых проводок с учетом маневренных характеристик судов, габаритных размеров каналов и фарватеров, климатических особенностей района плавания и местных правил путем создания методологических основ безопасной проводки каравана судов позволяет использовать современные методы управления с использованием основных положений новой теории ледового корабля и опыта морской практики ледовых проводок.

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению**

1. Круглогодичная устойчивая пропускная способность морских и речных портов Украины обеспечивается при условии ритмичности ледовых проводок караванов судов, которые имеют ледовый класс не ниже Л3 на каналах и фарватерах под проводкой двух ледоколов ледового класса не ниже Л5, один из которых лидирующий, а второй вспомогательный, осуществляющий околку каравана.
2. Ритмичность ледовых проводок на Азовском море обеспечивается вторичным движением караванов из 5÷10 судов на отдельных участках каналов и фарватеров.

3. Навигационная безопасность ледовой проводки гарантируется равномерным движением каравана со скоростью 1,5÷3,0 морских мили в зависимости от толщины и состояния ледяного покрова с интервалами между судами, которые равны дистанции пассивного торможения судна на спокойной воде, который движется сзади.
4. Лидирующий ледокол во время проводки на каналах и фарватерах двигается строго заданными курсами с углами рыскания не более 13°, совершая маневры: циркуляция, «ёлочка», «звезда», «на месте» в зависимости от размеров акватории для поворота или разворота, типа винто-рулевого комплекса и формы корпуса ледокола.
5. Вспомогательный ледокол во время ледовой проводки, осуществляя околку судов, движется вдоль каравана на полном ходу со стороны подвижной стороны ледового поля на расстоянии 10÷20 метров по траверзу от бортов в прямом и обратном направлениях.
6. Результаты исследования планируется использовать в расчетных моделях по определению: максимальных безопасных габаритных характеристик судов, движущихся в составе каравана или отдельно в зависимости от количества и типа предстоящих маневров и вида проводки; оптимального состава каравана для ледовой проводки; характеристик безопасной буксировки ледоколом аварийного судна по типу «тандем» в составе каравана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голиков В.В. Концепция конструкции ледокола для работы в Азовском море /В.В. Голиков, П.А. Костенко, А.А. Лысый, О.Н. Мазур/матер.наук.-техн. контр. “Энергетика судна: експлуатація та ремнот”05 – 07.04.2011р. ОНМА. – Одесса: ОНМА, 2011. – С.64 – 67
2. Аналитика аварийности на судах водного транспорта за 2001 – 2010 г.г.: справочник /В.В. Голиков, В.Д. Репетей, А.В. Шемелин– Одесса: Укрморинформ, 2011. – 226с.
3. Голиков В.В. Опыт проводки судов ледоколом “Капитан Белоусов” в зимнюю навигацию по Азовскому морю /В.В. Голиков, А.А. Лысый, П.А. Костенко // Судовые энергетические установки: наук.-техн. сб. – 2011. – Вып. 27. – Одесса: ОНМА. – С.39 – 44.
4. Голиков В.В. Расчет максимально допустимых проходных характеристик судна в портовых водах / В.В.Голиков, А.А. Лысый/ матер. наук.-метод. конф. “Забезпеченнябезаварійногоплавання суден” 16 – 17.11.2011р. ОНМА. – Одеса: ОНМА, 2012. – С.67 – 69.
5. Репетей В.Д. Особенности зимней навигации в Азовском море /В.Д. Репетей, В.В. Голиков, П.А. Костенко, А.А. Лысый // Судовождение: сб.научн.тр. – 2009. – Вып.17. – Одесса: ОНМА. – С.155 – 163.

6. РД 31.31.47-88 Нормы проектирования морских каналов / утв. ММФ СССР инструктивным письмом от 14.07.1988г. №114, дата введения 1988-10-01. – 24с.
7. РД 31.63.03-86 Рекомендации по назначению оптимального режима проводки судов на морских каналах / дтв. Письмом в/оМорстройзагранпоставка ММФ СССР 07.07.1986 г. №МР – 8/5480, дата введения 1987-06-01. – 53с.
8. Правила льодового проведення суден / зав. наказом Мінінфраструктури-України 4.04.2011р. За №447/19185. – 15с.
9. Сазанов К.Е. Управляемость судов во льдах: методы определения ледовых сил, действующих на движущийся по криволинейной траектории корпус, и зависимости показателей поворотливости судов от характеристик корпуса и внешних условий: диссерт. на соиск. уч. степеней докт. техн. наук по спец.: 05.08.01. - теория корабля и строительная механика ФГУП ЦНИИ им. ак.А.А. Крылова, Сп.б., Россия, 2004. – 285с.
10. Пашкин В.П. Дноуглубительные, рефулерные и гидромеханические работы/В.П. Пашкин, П.И. Яковлев, В.Т. Соколов. – Одесса: Астро-Принт, 1999. – 343с.
11. Голиков В.В. Расчетная схема определения эффективности движения судна по заданной траектории при ветроволновых нагрузках / В.В. Голиков, А.А. Светлаков // Судовождение: сб.научн. тр. – 2010. – Вып.19. – Одесса: ОН-МА. – С.55 – 59.