

Теория корабля и строительная механика

Научный обзор

УДК 624.124

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/19-29>

В.М. Козин, А.А. Лебедев

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, kozinvictor@rambler.ru
ЛЕБЕДЕВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ – магистр, инженер, lebedev.artem.28@yandex.ru
Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН
Комсомольск-на-Амуре, Россия

Энергоэффективные технологии разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке резонансным методом

Аннотация. Показаны возможности повышения энергоэффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова, осуществляемого судами на воздушной подушке. Поясняются физические основы этого метода разрушения льда. Резонансный метод может использоваться для продления навигации на внутренних водных путях, разрушения ледяного покрова в замерзающих портах, заливах и бухтах посредством более раннего вскрытия рек и водохранилищ. Как показала зарубежная и отечественная практика эксплуатации судов на воздушной подушке в ледовых условиях, резонансный метод может успешно применяться для предотвращения наводнений посредством разрушения возникающих в периоды ледостава и ледохода ледяных заторов и зажоров. Подобные ледовые осложнения, как правило, возникают в условиях мелководья или на предельно малых глубинах, где не могут работать ледоколы из-за их большой осадки. Амфибийные свойства судов на воздушной подушке позволяют успешно выполнять ледокольные работы в этих условиях. Показаны способы маневрирования СВП при разрушении заторов вблизи населенных пунктов, где проведение взрывных работ для их ликвидации из-за риска повреждения зданий невозможно. Установлено, что эффективность резонансного метода можно повысить, используя интерференции изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых в ледяном покрове одновременно несколькими судами. Приведены защищенные патентами РФ на изобретения и подтвержденные экспериментами в лабораторных и натурных условиях результаты эффективного использования групповой работы судов на воздушной подушке (движение судов фронтом, кильватерным строем и пр.). Показаны способы повышения энергоэффективности разрушения ледяного покрова: использование ледовых условий, разработка дополнительных конструкций и оснащение ими судов на воздушной подушке.

Ключевые слова: судно на воздушной подушке, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, резонанс, разрушение

Для цитирования: Козин В.М., Лебедев А.А. Энергоэффективные технологии разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке резонансным методом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 3(52). С. 19–29.

Введение

Известно, что основным средством разрушения ледяного покрова является ледокольный флот. Однако большие энергетические затраты на разрушение льда, невозможность использования ледоколов на малых глубинах из-за их большой осадки, а также для разрушения заторов и зажоров заставляют искать новые способы их ликвидации. Рассмотрены перспективы,

© Козин В.М., Лебедев А.А., 2022.

Статья: поступила: 18.04.2022; рецензия: 04.05.2022; финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН (Проект № 075-00742-22-00 от 27.12.2021).

связанные с использованием резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ) как средства возбуждения во льду движущейся нагрузкой резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ) [3]. При резонансной скорости частота изгибных волн, распространяющихся в свободно плавающей пластине, совпадает с частотой гравитационных волн на поверхности чистой воды. В этом случае архимедовы силы (силы плавучести) полностью уравниваются гидродинамическими силами, и вода перестает поддерживать ледяной покров. Равновесие ледяного покрова достигается только за счет внутренних сил упругости, возникающих в самой пластине. Это приводит к резкому увеличению амплитуды возбуждаемых ИГВ, что значительно повышает энергоэффективность разрушения льда по сравнению с известными методами. На основании этого метод разрушения ледяного покрова путем возбуждения резонансных ИГВ стали называть резонансным.

Резонансный метод может осуществляться любым транспортным средством, способным перемещаться по ледяному покрову с достаточной скоростью и создающим необходимую для разрушения льда нагрузку. Так, разрушение льда резонансными ИГВ наблюдалось во время движения автомашин, танков, поездов по ледяным переправам, а также при использовании ледяного покрова в качестве взлетно-посадочных полос для самолетов и автомобильных трасс.

Для решения ледотехнических задач на замерзающих водоемах с использованием резонансного метода необходимо возбуждать ИГВ значительной амплитуды. Для этого потребуются транспортные средства массой в десятки и сотни тонн, способные безопасно двигаться над льдом с большой скоростью. Пока этим требованиям отвечают только амфибийные суда на воздушной подушке (СВП), всепоходные качества которых позволяют, помимо всего прочего, разрушать ледяной покров на акваториях любой глубины. Обладая большой скоростью, маневренностью и амфибийными свойствами, СВП могут быстро перемещаться в районы с ледовыми осложнениями. Преимуществами СВП являются также отсутствие непосредственного контакта судна со льдом (это повышает надежность их эксплуатации), проходимость над заснеженным и затороженным ледяным покровом, безопасность движения над подводными островами, битым льдом, возможность выхода со льда на чистую воду и, наоборот, на необорудованный берег. Это позволяет решать ряд задач по продлению навигации на внутренних водных путях, использовать СВП для быстрого (с резонансной скоростью 20–25 км/ч) разрушения льда на больших площадях в целях более раннего вскрытия рек и водохранилищ. В периоды ледостава и ледохода для предотвращения экстремальных наводнений приходится избавляться от ледяных заторов и зажоров. В этих случаях РМРЛ окажется более эффективным по сравнению с традиционными технологиями.

В настоящее время объем перевозимых грузов явно недостаточен для полноценного снабжения отдаленных районов. Сезонность речного и уменьшение грузооборота морского флота в зимнее время приводит к перегрузке других видов транспорта. Проблема продления навигации особенно актуальна для регионов Севера, Сибири и Дальнего Востока. Для обеспечения навигации необходимо разрушение ледяного покрова в замерзающих портах, заливах и бухтах, при прокладке каналов во льду, а также в целях более раннего вскрытия рек и водохранилищ для использования их в качестве транспортных артерий при доставке грузов и пассажиров. Необходимость разрушения льда возникает и при обслуживании гидротехнических сооружений, когда маневренные СВП могут оказаться эффективнее портовых ледоколов. Таким образом, информация о возможностях повышения энергоэффективности РМРЛ, реализуемого СВП, представляет определенный практический интерес.

Использование маневрирования СВП

Явление разрушения льда вследствие развития в ледяном покрове волновых колебаний от движущегося СВП впервые обнаружено за рубежом при благоприятном стечении обстоятельств: толщина льда, давление в воздушной подушке, масса СВП и скорость его движения. Это произошло в январе 1974 г. при испытании канадского СВП «Вояжер» [27].

При перемещении этого судна массой 38,0 т и давлении в воздушной подушке 2,4 кПа со скоростью 6,2 м/с ледяной покров толщиной 38 см непрерывно растрескивался и окончательно разрушался на вершине возбуждаемых резонансных ИГВ. Неоднократные проходы судна приводили к измельчению плавающих льдин, сопровождавшемуся наложением кусков льда друг на друга, так что сплоченность льда получалась менее 10 баллов. При опытном маневрировании СВП удавалось нарастить интенсивность волнообразования в ледяном покрове, что повышало эффективность РМРЛ. В ходе исследований были найдены удачные приемы маневрирования СВП для разрушения льда [27].

Первый прием. После того как за судном в полной мере разовьются волновые колебания льда, то есть когда амплитуда возбуждаемых ИГВ достигнет максимальных значений, скорость СВП снижали так, что идущий за кормой первый гребень волны опережал судно и оно начинало как бы скатываться на ее подошву. В момент, когда судно получало максимальный дифферент на корму, скорость вновь повышали до прежнего резонансного значения. Амплитуды колебаний льда при этом возрастали, поскольку волновые движения ледяного покрова получали дополнительную энергию в такт с уже развившимся колебательным процессом (рис. 1). Авторы этого способа подобный режим называли «трамбующим» движением СВП. При повторе таких маневров начиналось непрерывное разрушение льда. Следует отметить, что подобный способ сокращает время от начала движения судна до момента разрушения льда, то есть уменьшает длину пути, на котором происходит возрастание амплитуды волн (это важно, если ледокольные работы выполняются на ограниченных по площади участках акваторий), и увеличивает толщину разрушаемого ледяного покрова. Натурные наблюдения за работой СВП показали, что разрушение льда резонансным методом в таком режиме подобно работе ледокола набегам.



Рис. 1. Разрушение льда СВП «Вояжер» первым приемом



Рис. 2. Разрушение льда СВП «Вояжер» вторым приемом

Второй прием. После возбуждения в ледяном покрове ИГВ максимальной амплитуды судно резко разворачивали на 180°, так что СВП встречало набегавшую на него ИГВ носом. При этом также начиналось разрушение льда (рис. 2). Это явление можно объяснить интерференцией первоначальных установившихся волн и системы неустановившихся колебаний, возникающих при торможении и развороте СВП, то есть при создании своеобразного гидроудара. С подобным явлением, по-видимому, сталкивались водители блокадного Ленинграда зимой 1942 г. на Ладожской трассе «Дорога жизни», когда автомашины проваливались под лед при торможении, хотя прочность льда не вызывала сомнения, поскольку рядом с образовавшейся майной проходили более загруженные машины [2].

Третий прием. В тех случаях, когда размеры ледяных полей не позволяли СВП двигаться достаточно долго для создания ИГВ требуемой амплитуды, поступали следующим образом. Вначале судно двигалось по свободной воде со скоростью, при которой волнообразование было наиболее интенсивным. При подходе к кромке ледяного покрова скорость судна на воздушной подушке уменьшали, и гравитационная волна, обогнав судно, проникала в ледяной покров, возбуждая в нем ИГВ (рис. 3).



Рис. 3. Разрушение льда СВП «Вояжер» третьим приемом

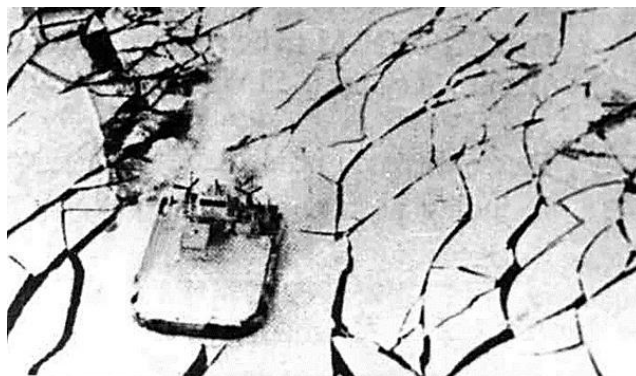


Рис. 4. Разрушение льда СВП «Вояжер» четвертым приемом

Четвертый прием. При разрушении ледяных нагромождений и заторов эффективным оказалось зигзагообразное движение СВП (рис. 4). В марте 1975 г., ликвидируя угрозу наводнения в г. Монреаль, судно «Вояжер», двигаясь перпендикулярными галсами, за 7 часов работы разрушило на мелкие куски ледяной остров длиной 400 м и шириной 150 м с толщиной наслоений льда до 5 м. Таким же методом судно за 20 часов разрушило еще один остров с наслоением льда до 2,4 м и длиной 4,8 км [26]. Использование этого приема повышало эффективность разрушения и тонкого льда. Особенно хорошо это было заметно, когда судно на воздушной подушке, двигаясь с резонансной скоростью, перемещалось зигзагообразно поперек течения [25]. Улучшение ледоразрушающих свойств судна при таком маневрировании, как и во втором приеме, можно объяснить благоприятной интерференцией волновых колебаний льда и воды.

Групповая работа судов

Ледоразрушающая способность судна на воздушной подушке определяется его параметрами и находится в зависимости от ледовых критериев, основными характеристиками которых считаются толщина льда и его физико-механические свойства, характеристики акватории, гидрометеорологические условия, и др. Главными параметрами, характеризующими способность судна на воздушной подушке разрушать лед резонансным способом, как показали экспериментально-теоретические исследования, считаются вес судна и создаваемая им интенсивность нагрузки на лед, то есть давление в воздушной подушке. Если при выполнении ледокольных работ этих параметров, создаваемых одним СВП, окажется недостаточно для разрушения ледяного покрова заданной толщины при заданных ледовых критериях, то для увеличения толщины разрушаемого льда разрешено применять интерференцию ИГВ, возбуждаемых несколькими СВП. На основании результатов экспериментов с двумя изготовленными крупномасштабными моделями СВП в полевых условиях (рис. 5), по итогам испытаний десантно-штурмовых кораблей на воздушной подушке (ДШК) «Скат» Амурской Краснознаменной флотилии (рис. 6) [3], опытов в ледовом бассейне Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (рис. 7) [1] и ряда теоретических исследований показана эффективность перемещения судов фронтом и кильватерным строем, разработаны практические советы по применению данных режимов перемещения [24].

Разумеется, что достоинства групповой работы СВП имеют все шансы проявиться и при других вариантах ее использования. К примеру, появляется возможность применения метода разрушения ледяного покрова на мелководье, включающего одновременное перемещение с резонансной скоростью в одном и том же направлении двух судов на воздушной подушке вдоль кромки льда; при этом первое судно перемещают по свободной воде, а второе – по непрерывному льду, позади первого на расстоянии, равном четверти длины резонансных ИГВ. Во время перемещения у судов периодически выключают и включают вентиляторно-подъемные комплексы с периодом времени, равным половине периода данных волн [4].



Рис. 5. Движение моделей СВП «фронтом»

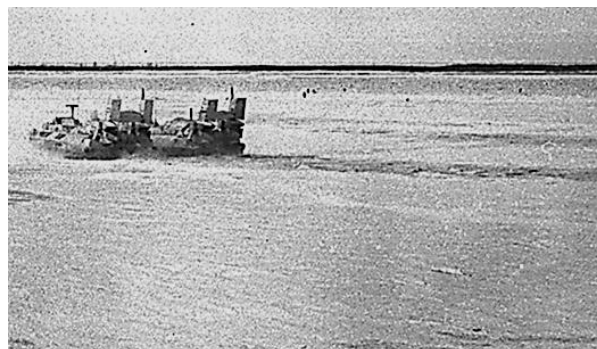
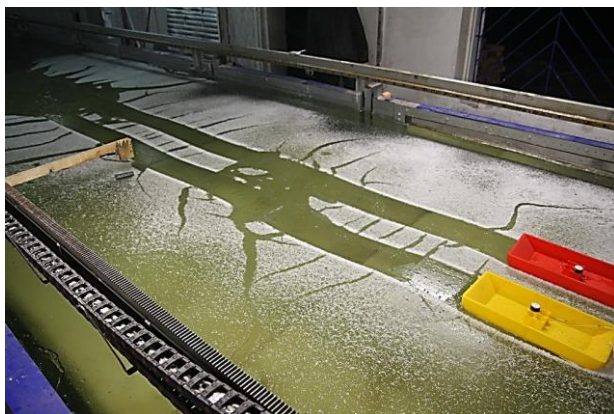


Рис. 6. Движение «фронтом» ДШК «Скат»



а)



б)

Рис. 7. Исследования эффективности разрушения ледяного покрова в ледовом бассейне при движении моделей СВП «фронтом» (а) и кильватерным строем (б)

В ходе разрушения ледяного покрова на мелководье вблизи береговой линии при одновременном движении в одном и том же направлении двух СВП вдоль кромки льда в непосредственной близости друг к другу и кромке льда первое судно следует перемещать по сплошному льду с резонансной скоростью для сплошного ледяного покрова, а второе – по свободной воде с критической скоростью для чистой воды сзади первого. Расстояние между ними обязано гарантировать наложение наибольшего по высоте гребня гравитационной волны от второго судна на первую, то есть самую глубокую впадину изгибно-гравитационной волны от первого судна, что увеличит ее глубину за счет веса влившейся на лед воды. Это позволит нарастить эффективность разрушения ледяного покрова резонансным способом [5]. К подобному итогу приведет взаимодействие двух СВП, если обеспечить расстояние между ними равным половине длины резонансных ИГВ, а характеристики первого судна достаточными для возбуждения гравитационных волн, высота гребней которых должна быть более глубины подошвы ИГВ. Это обеспечит заливание плоскости ледяного покрова гравитационными волнами перед вторым судном, что понизит прочность льда и соответственно повысит эффективность его разрушения [6].

Повысить эффективность резонансного метода разрушения льда можно благодаря тому, что при перемещении судна на воздушной подушке вдоль кромки ледяного покрова ему обеспечивают частичное смещение гибкого ограждения за кромку льда и накренения судна в ту же сторону. Это даст вероятность формирования под ледяным покровом воздушной полости, что устранил силы поддержания воды в данном месте. На гололед будут воздействовать только нагрузки от ИГВ, веса судна и силы тяжести самого льда, так как силы поддержания упругого основания (архимедовы либо силы плавучести) исчезнут. Это увеличит деформацию льда, делая легче процесс его разрушения [7].

Реализация резонансного метода разрушения льда сразу двумя СВП позволяет использовать их перемещение по синусоидальным траекториям, которые смещены относительно

друг друга на половину длины волны синусоиды и имеют амплитуду, необходимую для возбуждения резонансных ИГВ наибольшей высоты при сближении судов на минимально безопасное расстояние. Проекции скоростей как на продольное, так и поперечное направление перемещения судов обязаны быть равными скорости резонансных ИГВ. Повышение эффективности разрушения ледяного покрова достигается посредством интерференции резонансных ИГВ, возбуждаемых двумя судами, передвигающимися как в продольном (рис. 8а), так и поперечном (рис. 8б) направлении с резонансной скоростью [8].



а)



б)

Рис. 8. Движение СВП в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

В условиях мелководья эффективность РМРЛ, исполняемого сразу двумя СВП при наличии свободной кромки льда, можно повысить следующим методом. Вдоль кромки льда перемещают два судна, первое судно – по свободной воде, а второе – по непрерывному льду сзади главного на расстоянии от него, равном четверти длины резонансной ИГВ. Повышение эффективности разрушения ледяного покрова достигается посредством интерференции гравитационными и ИГВ, возбуждаемыми двумя судами, передвигающимися вдоль кромки ледяного покрова с резонансной скоростью в непосредственной близости друг к другу и кромке льда [9].

Использование ледовых условий

Способы повышения энергоэффективности разрушения ледяного покрова могут быть изобретены на базе применения ледовых критериев: переменной глубины водоема, близости прибрежной линии к месту выполнения ледокольных работ, подледного течения, наличия майн, колебаний уровня воды, заснеженности ледяного покрова, наличия подводных островов и пр. Это возможно потому, что их присутствие неизбежно приводит к трансформации характеристик, распространяющихся ИГВ. Использование данной закономерности позволит изменять НДС ледяного покрова в нужном направлении, то есть достигать роста ледоразрушающей возможности возбуждаемых ИГВ [3]. Так, РМРЛ имеет возможность более эффективно осуществляться на участках акваторий с максимальной скоростью подледного течения ввиду его перемещения в направлении, противоположном направлению скорости подводного течения и по линии движения, совпадающей с его линиями тока [10]. Подобного результата можно достигнуть, если резонансные ИГВ возбуждать в направлении, совпадающем с направлением максимальных сил сжатия во льду, появляющихся в природных естественных критериях [12].

Для использования возрастания уровня НДС ледяного покрова, возникающего на его береговой линии вследствие ее близости к месту выполнения ледокольных работ из-за резкого изменения глубины водоема, можно поступить следующим образом. Сначала СВП перемещают перпендикулярно кромке с резонансной скоростью (рис. 9а), и, если берег пологий, судно выходит на него, если берег крутой – судно разворачивают либо тормозят поблизости него, потом судно перемещают вдоль кромки с резонансной скоростью (рис. 9б) [11]. Использовать изменение НДС ледяного покрова вблизи прибрежной полосы при колебаниях уровня воды водоема можно следующим образом: вначале СВП перемещают вдоль

прибрежный полосы на расстоянии от кромки примерзшего к берегу льда, равном полудлине волны статического прогиба ледяного покрова, а потом с резонансной скоростью – вдоль свободной кромки, что повысит энергоэффективность резонансного метода разрушения ледяного покрова [13].



Рис. 9. Способы повышения эффективности РМРЛ:
а – движение СВП в сторону берега;
б – выход судна на берег и последующее движение вдоль него

Следующий способ увеличения энергоэффективности РМРЛ заключается в перемещении СВП на мелководье по чистой воде вдоль свободной кромки льда (рис. 10а), а потом – по кромке (рис. 10б) с резонансной скоростью. Одновременно с перемещением судна измеряют глубину водоема спереди него и под судном и в соответствии со значением резонансной скорости корректируют скорость перемещения судна в зависимости от глубины водоема (на мелководье, то есть в речных условиях, глубина воды определяет значение резонансной скорости [3]), что приводит к увеличению толщины разрушаемого ледяного покрова [14].



Рис. 10. Использование свободной кромки для увеличения толщины разрушаемого льда:
а – движение вдоль свободной кромки; б – движение по ней него

Эффективность разрушения льда СВП резонансным методом можно повысить следующим образом: до начала ледокольных работ определяют менее крепкие участки ледяного покрова; после их вскрытия (разрушения) приступают к ломке резонансным способом наиболее крепких участков льда. Менее крепкие участки льда предварительно выявляют с помощью прибора, например ультразвукового дефектоскопа, способного определить толщину и структуру льда [15].

Использование дополнительных конструкций

Если характеристики СВП недостаточны для разрушения ледяного покрова резонансным способом в заранее известных ледовых условиях, то на судне может быть установлен вертикальный плунжер, который при помощи гидропривода способен выдвигаться на высоту больше высоты парения дна СВП над поверхностью льда. Это обеспечит замену распределенной нагрузки от давления в воздушной подушке судна на сосредоточенную, что увеличит изгибные напряжения во льду. После этого плунжеру следует сообщить периодические вертикальные

движения с частотой резонансных ИГВ, что вызовет резонансное повышение изгибных напряжений. Локализация нагрузки на лед от веса судна и ее динамическое воздействие с частотой резонансных ИГВ может привести к разрушению ледяного покрова и образованию в нем майны с относительно небольшими энергозатратами. Для применения данной конструкции судно на воздушной подушке удаляют от майны и потом начинают перемещение судна с резонансной скоростью в сторону майны. В момент прохождения майны амплитуды изгибно-гравитационных волн будут неизбежно возрастать, что вызовет разрушение наиболее толстого льда (по сравнению с использованием СВП без рекомендуемого устройства) и с наименьшими энергозатратами [16]. Майну также можно подготовить с помощью ледового бура с водопроточным каналом, который присоединяется к насосу. Просверлив отверстия во льду и подключив насос, из-под льда начинают откачивать воду. Давление воды под ледяным покровом упадет, а над ним вследствие влившейся воды – возрастет. Кроме того, произойдет нагрев льда водой сверху, что приведет к уменьшению модуля упругости и прочности льда. В итоге произойдет разрушение ледяного покрова и образование в нем майны. После этого насос выключают, ледовый бур задвигают в исходное положение и начинают перемещение СВП по вышеописанной схеме [17].

Ледоразрушающую способность СВП можно повысить благодаря установке на нем внутреннего гибкого ограждения, сделанного в виде выдвижной юбки. Для создания за ее счет невесомой подушки и обеспечения остойчивости судна следует предусмотреть наличие дополнительного компрессора высокого давления и четырех выдвижных элементов конусного вида, находящихся в угловых секторах судна. Их снабжение воздухом следует осуществлять от вентилятора судна при отключенной подаче воздуха во внешнее эластичное ограждение [18]. Для достижения подобной цели можно применить систему СВП с внутренним эластичным ограждением, выполненным в виде выдвижной юбки меньшей площади, нежели площадь наружного эластичного ограждения. Оно должно запитываться дополнительным компрессором высокого давления и способно передвигаться под корпусом судна в горизонтальной плоскости для смещения центра аэродинамического давления внутреннего эластичного ограждения [19].

Для увеличения энергоэффективности РМРЛ, осуществляемого СВП, можно применять и аэродинамические силы, действующие на их корпус. Так, при перемещении судна с резонансной скоростью создают аэродинамическую подъемную силу, нацеленную книзу, путем поворота горизонтальных пластинок, предварительно установленных на верхней палубе на отрицательный угол атаки по направлению к набегающему потоку воздуха. Временами угол атаки изменяют с частотой резонансных ИГВ, что приводит к возбуждению системы дополнительных резонансных ИГВ. Их интерференция позволит увеличить толщину разрушаемого льда [20]. Сформировать дополнительную вертикальную нагрузку на лед можно и за счет упора воздушных винтов посредством дифференровки судна на нос соответствующими судовыми системами [21].

Дополнительное устройство для увеличения эффективности РМРЛ имеет возможность представлять собой электрогидравлический водомет для образования гидроудара под вершиной ИГВ, возбуждаемых ходом судна с резонансной скоростью вдоль кромки ледяного покрова [22]. Для этих же целей в процессе перемещения судна создают дополнительную периодическую нагрузку на лед с помощью гидропушки, выстреливающей в направлении перемещения судна порции воды с частотой, равной частоте резонансных ИГВ, и на расстояние, обеспечивающее падение масс воды на их подошву [23].

Заключение

Обзор исследований по возможностям повышения энергоэффективности разрушения ледяного покрова СВП резонансным методом дает на практике использовать приведенные в работе технологии. В статье показаны способы маневрирования судов при разрушении заторов вблизи населенных пунктов, где проведение взрывных работ для их ликвидации из-за

риска повреждения зданий невозможно. Сделано заключение, что, если при выполнении ледокольных работ одиночным судном его масса и давление в воздушной подушке окажутся недостаточными для разрушения льда заданной толщины, эффективность резонансного метода можно повысить благодаря использованию интерференции ИГВ, возбуждаемых в ледяном покрове одновременно несколькими судами. Приведены защищенные патентами РФ на изобретения и подтвержденные экспериментами в лабораторных и натуральных условиях результаты эффективного использования групповой работы СВП. Также описаны способы повышения энергоэффективности разрушения ледяного покрова при помощи использования ледовых условий и разработанных дополнительных конструкций СВП.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН (Проект № 075-00742-22-00 от 27.12.2021 г.).

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Земляк В.Л., Козин В.М. Ледовый бассейн лаборатории ледотехники // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2021. № 1(42). С. 19–31. DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
2. Иванов К.Е., Кобеко П.П., Шульман А.Р. Деформация ледового покрова при движении грузов // Журнал технической физики. 1946. Т. 16. С. 257–262.
3. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: Изобретения и эксперименты. Москва: Академия естествознания, 2007. 355 с.
4. Пат. 2709979 РФ. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье / Васильев А.С. // Кл. В63В 35/08 от 23.12.2019. Бюл. № 36.
5. Пат. 2725458 РФ. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье / Радионов С.В., Назарова В.П. // Кл. В63В 35/083 от 02.07.2020. Бюл. № 19.
6. Пат. 2725570 РФ. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье / Земляк В.Л., Радионов С.В., Назарова В.П., // Кл. В63В 35/083 от 02.07.2020. Бюл. № 19.
7. Пат. 2725645 РФ. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье / Земляк В.Л., Васильев А.С., Ипатов К.И. // Кл. В63В 35/083 от 03.07.2020. Бюл. № 19.
8. Пат. 2725938 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Земляк В.Л. // Кл. В63В 35/083 от 07.07.2020. Бюл. № 19.
9. Пат. 2457975 РФ. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье / Верещагин В.Ю. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 10.08.2012. Бюл. № 22.
10. Пат. 2188893 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 10.09.2002. Бюл. № 25.
11. Пат. 2203826 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 10.05.2003. Бюл. № 14.
12. Пат. 2211170 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.08.2003. Бюл. № 24.
13. Пат. 2211169 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.08.2003. Бюл. № 24.
14. Пат. 2258630 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Джабраилов М.Р. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 20.08.2005. Бюл. № 23.
15. Пат. 2258631 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Джабраилов М.Р. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 20.08.2005. Бюл. № 23.
16. Пат. 2173651 РФ. Ледокольное судно на воздушной подушке / Ломакина Н.С. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 20.09.2001. Бюл. № 26.
17. Пат. 2205123 РФ. Ледокольное судно на воздушной подушке / Погорелова А.В. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.05.2003. Бюл. № 15.
18. Пат. 2205125 РФ. Ледокольное судно на воздушной подушке / Погорелова А.В. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.05.2003. Бюл. № 15.

19. Пат. 2205126 РФ. Ледокольное судно на воздушной подушке / Погорелова А.В. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.05.2003. Бюл. № 15.
20. Пат. 2197576 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.01.2003. Бюл. № 2.
21. Пат. 2188896 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 10.09.2002. Бюл. № 25.
22. Пат. 2245274 РФ. Устройство для разрушения ледяного покрова / Погорелова А.В. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.01.2005. Бюл. № 3.
23. Пат. 2506194 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Гринкруг Л.С. // МПК В23В 35/08. Оpubл. 10.02.2014. Бюл. № 4.
24. Рогожникова Е.Г. Поведение ледяного покрова в условиях изгибно-гравитационного резонанса при парном движении нагрузок. Новосибирск: СО РАН, 2019. 120 с.
25. Смигельский С.П. Об американских работах по программе создания арктического КВП // Судостроение за рубежом. 1978. № 3(135). С. 3–18.
26. Честнов Е.И. Использование судов на воздушной подушке для взламывания льда // Передовой опыт и новая техника. 1979. Вып. 2(62). С. 69–73.
27. Dutfild D.O., Dickins D.E. Icebreakers trials with Bell Aerospace Voyager ACV. *Canadian aeronautics and space journal*. 1974;20(10):471–474.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 3/52

Theory of the Ship and Construction Mechanicswww.dvfu.ru/en/vestnikis

Review article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/19-29>

Kozin V., Lebedev A.

VIKTOR M. KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher
of the Laboratory for Problems of Creation and Processing of Materials
and Products, kozinvictor@rambler.ru

ARTEM A. LEBEDEV, Postgraduate Student, Engineer lebedev.artem.28@yandex.ru
Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS
Komsomolsk-on-Amur, Russia

Energy-efficient technologies for breaking ice cover by hovercraft by the resonance method

Abstract. The possibilities of increasing the energy efficiency of the resonant method of ice cover failure carried out by hovercraft are shown. The physical foundations of this method of ice destruction are explained. The resonance method can be used to prolong navigation on inland waterways, breaking ice cover in freezing ports, bays and harbors by opening rivers and reservoirs earlier. As shown by foreign and domestic practice of operating hovercraft in ice conditions, the resonance method can be successfully used to prevent floods by destroying ice jamming that occur during periods of freeze-up and ice drift. Such ice complications, as a rule, occur in shallow water conditions or at extremely shallow depths, where icebreakers cannot operate due to their large draft. The amphibious properties of hovercraft make it possible to successfully carry out icebreaking operations in these conditions. The ways of maneuvering the hovercraft during the destruction of congestion near settlements are shown, where blasting to eliminate them is impossible due to the risk of damage to buildings. It has been established that the efficiency of the resonance method can be increased by using the interference of flexural-gravity waves excited in the ice cover simultaneously by several vessels. The results of the effective use of the group work of hovercraft (vessel movement by the front, wake formation, etc.) are presented, protected by patents of the Russian Federation for inventions and confirmed by laboratory and field tests. Ways to improve the energy efficiency of ice cover failure are shown: the use of ice conditions, the development of additional structures and equipping hovercraft with them.

Keywords: hovercraft, ice cover, flexural gravity waves, resonance, destruction

For citation: Kozin V., Lebedev A. Energy-efficient technologies for breaking ice cover by hovercraft by the resonance method. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):19-29. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Zemlyak V.L., Kozin V.M. Ice tank of ice technology laboratory. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema*. 2021;(1):19–31. (In Russ.). DOI: 10.24412/2227-1384-2021-142-19-31
2. Ivanov K.E., Kobeko P.P., Shulman A.R. Deformation of the ice cover during the movement of goods. *J. of technical physics*. 1946;16:257–262. (In Russ.).
3. Kozin V.M. Resonance method of destruction of the ice cover: Inventions and experiments. Moscow: Academy of Natural Sciences. 2007. 355 p. (In Russ.).
4. Pat. 2709979 RF. The method of destruction of the ice cover in shallow water. Vasiliev A.S. *Cl. B63B 35/08 dated 12/23/2019. Bull. No. 36*. (In Russ.).
5. Pat. 2725458 RF. The method of destruction of the ice cover in shallow water. Radionov S.V., Nazarova V.P. *Cl. B63B 35/083 dated 07/02/2020. Bull. No. 19*. (In Russ.).
6. Pat. 2725570 RF. The method of destruction of the ice cover in shallow water. Zemlyak V.L., Radionov S.V., Nazarova V.P. *Kl. B63B 35/083 dated 07/02/2020. Bull. No. 19*. (In Russ.).
7. Pat. 2725645 RF. The method of destruction of the ice cover in shallow water. Zemlyak V.L., Vasiliev A.S., Ipatov K.I. *Cl. B63B 35/083 of 07/03/2020. Bull. No. 19*. (In Russ.).
8. Pat. 2725938 RF. The method of destruction of the ice cover. Countryman V.L. *Cl. B63B 35/083 of 07/07/2020. Bull. No. 19*. (In Russ.).
9. Pat. 2457975 RF. The method of destruction of the ice cover in shallow water. Vereshchagin V.Yu. *MPK V63V 35/08. Published 08/10/2012. Bull. No. 22*. (In Russ.).
10. Pat. 2188893 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published 09/10/2002. Bull. No. 25*. (In Russ.).
11. Pat. 2203826 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published May 10, 2003. Bull. No. 14*. (In Russ.).
12. Pat. 2211170 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published 08/27/2003. Bull. No. 24*. (In Russ.).
13. Pat. 2211169 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published 08/27/2003. Bull. No. 24*. (In Russ.).
14. Pat. 2258630 RF. The method of destruction of the ice cover. Dzhabrailov M.R. *IPC V63V 35/08. Published 08/20/2005. Bull. No. 23*. (In Russ.).
15. Pat. 2258631 RF. The method of destruction of the ice cover. Dzhabrailov M.R. *IPC V63V 35/08. Published 08/20/2005. Bull. No. 23*. (In Russ.).
16. Pat. 2173651 RF. Icebreaking hovercraft. Lomakina N.S. *IPC V63V 35/08. Published 09/20/2001. Bull. No. 26*. (In Russ.).
17. Pat. 2205123 RF. Icebreaking hovercraft. Pogorelova A.V. *IPC V63V 35/08. Published May 27, 2003. Bull. No. 15*. (In Russ.).
18. Pat. 2205125 RF. Icebreaking hovercraft. Pogorelova A.V. *IPC V63V 35/08. Published May 27, 2003. Bull. No. 15*. (In Russ.).
19. Pat. 2205126 RF. Icebreaking hovercraft. Pogorelova A.V. *IPC V63V 35/08. Published May 27, 2003. Bull. No. 15*. (In Russ.).
20. Pat. 2197576 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published 01/27/2003. Bull. No. 2*. (In Russ.).
21. Pat. 2188896 RF. The method of destruction of the ice cover. Kozin V.M. *IPC V63V 35/08. Published 09/10/2002. Bull. No. 25*. (In Russ.).
22. Pat. 2245274 RF. Device for the destruction of the ice cover. Pogorelova A.V. *IPC V63V 35/08. Published 01/27/2005. Bull. No. 3*. (In Russ.).
23. Pat. 2506194 RF. The method of destruction of the ice cover. Grinkrug L.S. *IPC V23V 35/08. Published 02/10/2014. Bull. No. 4*. (In Russ.).
24. Rogozhnikova E.G. Behavior of the ice cover under conditions of flexural-gravitational resonance with pair motion of loads. Novosibirsk: SO RAN. 2019. 120 p. (In Russ.).
25. Smigelsky S.P. About the American work on the program for the creation of the Arctic STOL. *Ship-building abroad*. 1978;(3):3–18. (In Russ.).
26. Chestnov E.I. Use of hovercraft to break ice. *Advanced experience and new technology*. 1979;(2):69–73. (In Russ.).
27. Dutfeld D.O., Dickins D.E. Icebreakers trials with Bell Aerospace Voyager ACV. *Canadian Aeronautics and space journal*. 1974;20(10):471–474.