

ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ «ПОДУШКИ» У КОРПУСА ЛЕДОКОЛА

К. П. ТЫШКО, Н. В. ЧЕРЕПАНОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Результаты исследований фазового состава ледовой «подушки» у корпуса ледокола показали, что механизм возникновения этого явления (облипания) связан с динамическими условиями ледообразования, обеспечивающими формирование под ледяным покровом мощного слоя внутриводного или шугового льда. При моделировании механизма облипания в лабораторных условиях прежде всего учитывалось то, что внутриводное ледо- и шугообразование может происходить, как при наличии переохлаждения воды, так и непосредственно за счет теплооттока с открытой поверхности воды в зимний период. В результате проведения исследований по этим направлениям были предложены две физические модели возникновения этого явления. В первой из них контакт между кристаллами льда и корпусом ледокола возникает при его вхождении в зону такого льда при наличии переохлаждения поверхностного слоя воды и быстрой реализации энергии переохлаждения (термодинамическая модель). Во втором случае этот контакт обеспечивается действием гидравлических сил при заборе воды через специальные емкости (ледовые ящики), имеющие на внешнем корпусе небольшие отверстия или прорезы, вблизи которых и происходит формирование первичного слоя ледовой «подушки» (гидравлическая модель). Обе модели наглядно подтвердили определяющую роль подледного слоя внутриводного и шугового льда в процессе формирования ледовой «подушки».

Натурные контактные исследования условий формирования ледовой «подушки» у корпуса таких ледоколов, как «Ленин», «Сибирь» и «Арктика», проведенные в различных районах Карского моря (рис. 1), показали, что, несмотря на различие морфологических характеристик ледяного покрова и термохалинного строения поверхностных слоев воды в них, при возникновении этого явления под ледяным покровом всегда присутствует мощный слой шуги или внутриводного льда толщиной несколько метров, состоящий из мелких изометрических кристаллов диаметром не более 5 мм. При этом в результате бурения льда в самой «подушке» оказалось, что на 80–90 % своей толщины, которая может достигать 6–8 м, она состоит из этих кристаллов, удерживающих на своей поверхности большие обломки льда.

На основании проведенных исследований фазового состава этого ледового образования было сделано заключение о том, что механизм возникновения облипания должен быть связан с динамическими условиями ледообразования, обеспечивающими формирование под ледяным покровом этого слоя внутриводного или шугового льда. Этот вывод подтверждается также и тем, что в большинстве случаев такой процесс наблюдается при нарушении сплошности ледяного покрова вследствие его динамических подвижек и образовании открытых участков чистой воды. Поскольку трасса Севморпути в Карском море проходит по краевым зонам дрейфующего ледяного массива и районам заприпайных полыней, где наблюдается наиболее интенсивное формирование внутриводного и шугового льда [4, 8], то вполне закономерной выглядит и равная вероятность возникновения явления об-

липания на всей ее протяженности, о чем свидетельствуют многолетние статистические данные [2].

Кроме того, результаты многолетних лабораторных экспериментов и натуральных исследований позволили сделать еще целый ряд выводов об условиях возникновения облипания ледоколов и судов в море:

1. Возникновение явления облипания может происходить при разнообразных гидрометеорологических и ледовых условиях.

2. Отсутствие изменений вертикального распределения температурного градиента по корпусу ледокола и величины разности электрических потенциалов при его взаимодействии со льдом в момент формирования ледовой «подушки» свидетельствует о том, что эти два физических параметра не могут являться первопричиной возникновения исследуемого процесса.

3. Термохалинное расслоение в подледном слое внутриводного (шугового) льда может в значительной степени способствовать возникновению явления облипания.

4. Механизм возникновения контакта внутриводного (шугового) льда с корпусом ледокола, обуславливающий формирование ледовой «подушки», должен хорошо согласовываться со следующими результатами наблюдений:

- исчезновение контакта льда с металлом при увеличении скорости ледокола;
- отсутствие смерзания кристаллов внутриводного (шугового) льда между собой, с обломками ледяного покрова и корпусом ледокола в ледовой «подушке»;
- несимметричность формирования ледовой «подушки» при работе даже в одном и том же участке ледяного покрова;
- сжатие льда способствует формированию ледовой «подушки», а его расстрескивание и взлом ликвидируют ее.

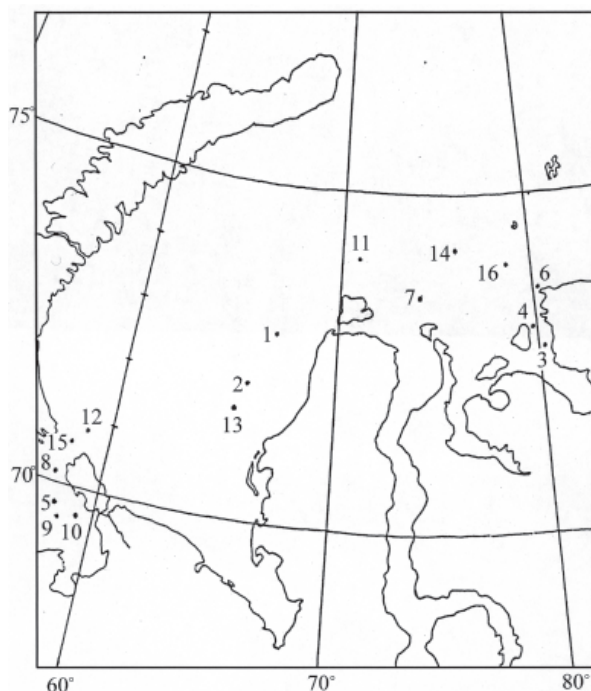


Рис. 1. Местоположения точек натурального исследования явления облипания а/л «Ленин» в декабре–январе 1987/88 г. (точки 1–10) и «Арктика» в декабре–январе 1988/89 г. (точки 11–16)

Таким образом, на основании сделанных выводов при моделировании механизма облипания в лабораторных условиях прежде всего учитывалось то, что внутриводное ледо- и шугообразование может происходить как при наличии переохлаждения воды (например, в прибрежных районах контакта пресных и морских вод), так и непосредственно за счет теплооттока с открытой поверхности воды в зимний период. В результате проведения исследований по этим направлениям были предложены две физические модели возникновения этого явления. В первой из них контакт между кристаллами льда и корпусом ледокола возникает при вхождении его в зону такого льда при наличии переохлаждения поверхностного слоя воды и быстрой реализации энергии переохлаждения (термодинамическая модель). В лабораторных условиях из-за невозможности создания двухслойной системы, состоящей из слоев снежно-ледяной смеси и переохлажденной воды, эта модель реализовывалась двумя способами. В первом случае протяжка модели в переохлажденной воде сопровождалась одновременной рассыпкой узкой полосы снега на ее поверхность непосредственно перед носом движущейся модели. В другой части опытов снежно-ледяная смесь или смесь из кристаллов внутриводного льда, снега и мелко раздробленного льда помещалась в лоток с морской водой, а в отдельной емкости приготавливалась переохлажденная вода. В дальнейшем при циркуляции водно-ледяной смеси к носовой части модели, находящейся в фиксированном положении, с помощью резинового шланга подливалась переохлажденная вода. В обоих случаях корпус модели покрывался более или менее равномерным слоем ледяных кристаллов (рис. 2).

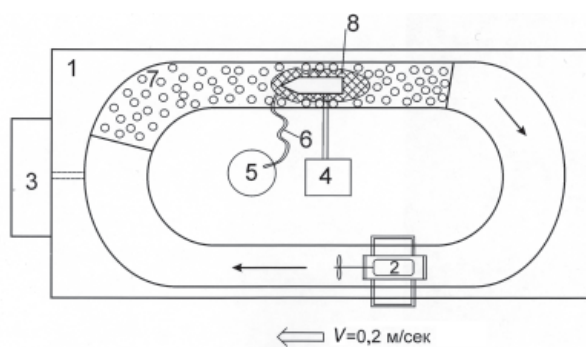


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения лабораторных исследований механизма облипания:

1 – большой эллипсоидный лоток; 2 – электромеханическое устройство для создания потока водно-шуговой смеси; 3 – компенсатор давления; 4 – зафиксированная модель судна; 5 – емкость с переохлажденной водой; 6 – резиновый шланг; 7 – мелкозернистый шуговой слой на поверхности воды; 8 – модель ледовой «подушки»

Механизм второй модели формирования ледовой «подушки» обеспечивается действием гидравлических сил при заборе воды через специальные емкости (ледовые ящики), имеющие на внешнем корпусе небольшие отверстия или прорези, вблизи которых и происходит формирование первичного слоя ледовой «подушки». Этот слой, фильтруя через себя воду, чрезвычайно быстро увеличивается в размерах, в основном по вертикали, пока не достигнет нижней поверхности ледяного покрова (гидравлическая модель). При этом прижимная сила кристаллов льда к корпусу ледокола, по-видимому, будет определяться величиной напора насоса, которая в общем виде [1] может быть представлена как

$$H = H_H - H_B = (P_H - P_B)/\rho g + (Z_H - Z_B) + (V_H - V_B)/2g, \quad (1)$$

где H_H — напор нагнетания на выходе, H_B — напор всасываемый, P_H, P_B — давление нагнетания и разрежения на входе, Z_H, Z_B — высоты отводящего и подводящего трубопровода, V_H, V_B — скорости потоков на выходе и на входе.

Таким образом, кристаллы льда, скопившиеся на внешнем корпусе ледокола в районе ледовых ящиков, формируют первичный слой «подушки».

При реализации данного механизма в лабораторных условиях использовалась деревянная модель судна, корпус которой имел металлическое покрытие. В нижней части корпуса были сделаны маленькие отверстия диаметром 2–3 мм, имеющие общий выход на верхнюю поверхность модели. В это отверстие диаметром 8 мм вставлялась металлическая трубка, на которую надевался резиновый шланг для забора воды (рис. 3 а). Таким способом моделировалась работа ледовых ящиков в корпусе ледокола. Модель опускалась в водный поток соленостью 35 ‰ и фиксировалась на специальном кронштейне. Аналогично натурным условиям возникновения облипания поток наполнялся мелкозернистыми кристаллами либо внутриводного льда, либо снега. При заборе воды через шланг моментально формировалась ледовая «подушка» (рис. 3 б), а через 1–2 мин вся шуга в лотке скапливалась вокруг корпуса модели. Затем фиксатор на кронштейне отпускался, и модель перемещалась по лотку навстречу потоку. Вся масса шуги перемещалась вместе с моделью. При этом «подушка» нагружалась обломками льда размером в несколько см, масса которых многократно превосходила массу кристаллов шуги. «Подушка» моментально «отлипала» от модели, как только забор воды прекращался.

В обеих лабораторных моделях механизма возникновения облипания контакт кристаллов внутриводного льда, шуги и снега с корпусом модели судна осуществлялся без наличия сплошного ледяного покрова на поверхности лотка. Од-

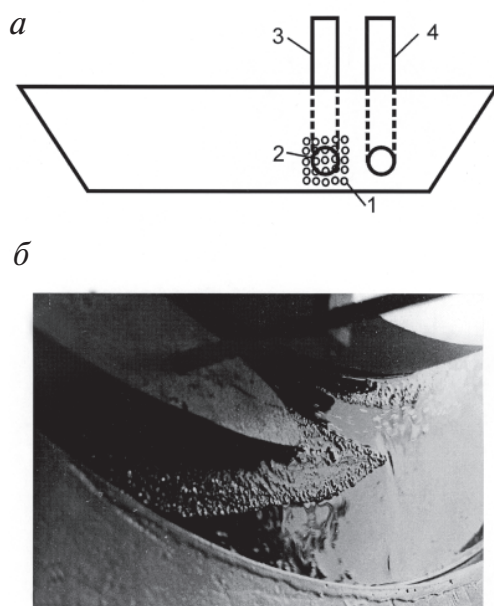


Рис. 3. Лабораторная гидравлическая модель возникновения облипания судна: а — общий вид корпуса модели судна и б — ледовая «подушка» у корпуса модели:

1 — отверстия в металлической обшивке модели для забора воды; 2 — объединяющее отверстие в деревянном корпусе модели; 3 — выводная трубка для забора воды; 4 — трубка для подачи воздуха

нако и в том и в другом случае предполагается, что взлом ледяного покрова и остановка ледокола происходят тогда, когда уплотнение шугообразной массы под ледяным покровом достигнет своего критического значения. Это выражается в том, что расстояние между кристаллами и, соответственно, толщина жидкой пленки уменьшается настолько, что между ними возникает сила так называемого пленочного взаимодействия [6, 7]. Не останавливаясь на физическом механизме этого явления, который довольно подробно рассмотрен в [6], отметим только, что оно может играть решающую роль на заключительной стадии формирования ледовой «подушки», поскольку, как уже отмечалось, смерзания кристаллов в ней не происходит. Для подтверждения этого предположения можно оценить соотношение количественных значений силовых нагрузок, возникающих в период развития этого процесса. В данном случае основной прочностной характеристикой ледяного покрова и контактирующей с ним шуги является предел прочности льда на срез в горизонтальном направлении, когда шуговой слой, контактирующий с корпусом ледокола, начинает отрывать куски льда, препятствуя тем самым его продвижению и увеличивая массу ледовой «подушки». В результате натурных исследований этого явления в Карском море было обнаружено, что в зоне формирования ледовой «подушки» в значительной степени преобладает лед мелкозернистой кристаллической структуры типа В7, В8 [5], формирующийся, как правило, в результате смерзания кристаллов внутриводного и шугового льда, находящихся под ледяным покровом. Для оценки значений предела прочности льда этого типа при срезе для наиболее распространенных среднеинтегральных значений его температуры $-5...-10$ °С можно использовать полученные соотношения между этим параметром и пределом прочности льда при изгибе [3]. Так, ранее проведенные исследования показали, что значения $\sigma_{изг}$ для льда, имеющего мелкозернистую изометрическую структуру, в указанном температурном диапазоне изменяются в пределах 0,2–0,6 МПа [8]. Этим значениям $\sigma_{изг}$ согласно [3], соответствует диапазон величин $\sigma_{ср}$ от 0,02 до 0,23 МПа, которые в среднем составляют 0,12–0,13 МПа. В свою очередь сила пленочного взаимодействия двух кристаллов льда с учетом площади контакта достигает 0,012 МПа [7]. При наиболее плотной упаковке равных по размеру кристаллов диаметром 2–3 мм количество таких связей в единичном объеме может увеличиться до 18, что соответствует значению прочности 0,22 МПа. Таким образом, сила взаимодействия кристаллов в шуговом слое оказывается достаточной для отрыва отдельных кусков льда от ледяного покрова.

С другой стороны, формированию первичного шугового слоя ледовой «подушки» препятствует давление воды, создаваемое в результате движения ледокола, которое в общем виде для единичной поверхности может быть выражено в виде:

$$P = \rho V^2/2, \quad (2)$$

где $\rho = 102$ кг·сек²/м² – массовая плотность воды, V – скорость потока.

Поскольку в полях сморози тонкого и среднего льда толщиной 50–100 см, в которых наиболее часто формируется ледовая «подушка», ледокол движется со скоростью не более 5–6 узлов, то величина динамического давления потока составит 0,004 МПа. Это почти вдвое меньше силы пленочного взаимодействия кристаллов льда с корпусом ледокола, которая для упомянутых выше условий может достигать 0,008 МПа [7]. Однако в период проведения натурных исследований в двух случаях из 16 (точки 7 и 12, рис. 1) работы проводились на поле сморози серо-белого и тонкого льда толщиной 30–35 см, под которым также присутствовал слой шугового льда толщиной 2,5–3,0 м. При движении в нем со скоростью 12 узлов облипания не было, а наблюдалось лишь характерная подвижка обломков льда вдоль корпуса на расстояние 5–10 м. Как только ледокол специально снижал скорость до 5–6 узлов, образовывалась ледовая «подушка» и ледокол полностью терял ход. При возобнов-

лении движения с полной мощностью картина повторялась. Таким образом, проведенный натурный эксперимент полностью подтвердил влияние удельного давления водного потока на образование первичного слоя ледовой «подушки», который не мог формироваться при увеличении значения этого параметра до 0,019 МПа.

В заключение необходимо отметить, что независимо от энергетического механизма, обуславливающего контакт ледяных кристаллов с корпусом ледокола, проведенные лабораторные эксперименты наглядно подтвердили определяющую роль подледного слоя внутриводного и шугового льда в процессе формирования ледовой «подушки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А. Насосы и компрессоры. М.: Недра, 1974. 296 с.
2. Адамович Н.М. Ледовые условия западного района Советской Арктики в холодный период года и учет их влияния на судоходство: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л., 1987. 18 с.
3. Петров И.Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда // Тр. ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 4–42.
4. Тышко К.П., Черепанов Н.В. Особенности динамического ледообразования в арктических морях: Тезисы докладов 1-й международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России». Л.: 1993. С. 90–92.
5. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Тр. ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
6. Hobbs P.V., Mason B.J. The sintering and adhesion of ice // Phil. Mag. 1964. Vol. 9. № 98. P. 181–197.
7. Hosler C.L. and oth. On the aggregation of ice crystals to form snow // J. of Meteorology. 1957. Vol. 14, № 5. P. 415–420.
8. Strakhov M.V., Tyshko K.P., Fedotov V.I., Cherepanov N.V. The Peculiarities of the Kara and Barents Seas Ice Cover Formation and Schematic Mapping of its Structure and Main Physical Properties // Proc. of 13-th Intern. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition (POAC-95), August 15–18, 1995. Murmansk–St.Petersburg, 1995. P. 81–94.

K.P.TYSHKO, N.V.CHEREPANOV

LABORATORY AND NATURAL INVESTIGATIONS OF MECHANISM OF «ICE-CUSHION» FORMATION NEAR THE ICEBREAKER'S BOARD

The results of natural investigation of «ice-cushion» composition near the icebreaker's board showed that mechanism of the development of this phenomenon (in other way ice sticking) is closely linked with dynamic conditions of ice formation that provide appearing under ice cover a thick layer of frazil ice. Laboratory modeling of ice sticking was conducted with accounting two basic things: frazil ice can form both at the presence of water supercooling and the heat outflow from open water during winter. In the result of investigations on both directions two models of this phenomenon were proposed. In one of them the contact between ice crystals and the board of icebreaker appears when its entering in the zone of such ice causes the fast realization of the energy of supercooled surface water layer (thermodynamic model). In the second model this contact is provided by hydraulic forces acting in process of taking sea water on board through special tanks (ice boxes). In icebreaker's hull they have small holes or notches near those the first contact layer of «ice-cushion» forms (hydraulic model). Both models support the idea about basic role of frazil ice in the mechanism of ice sticking.