

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ССРС  
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

ОРДЕНА ЛЕНИНА АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ТЯЛКО

Константин Львович

УДК 551.336.2

ВНУТРИВОДНЫЙ ЛЕД И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ЛЕДЯНОГО  
ПОКРОВА В МОРЯХ ПОЛЮСНЫХ ОБЛАСТЕЙ

11.00.08 - ОКЕАНОЛОГИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

ЛЕНИНГРАД  
1980

Работа выполнена в ордена Ленина Арктического и антарктического научно-исследовательского института.

Научный руководитель -  
доктор географических наук А. И. БУЗУЛЯ

Официальные оппоненты:  
доктор географических наук В. В. ЛАНОЗ  
кандидат географических наук Ж. А. ДМИТРАШ

Ведущая организация: Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрометеорологии им. П. П. Вережневца.

Защита диссертации состоится "22" ноября 1990 г.

в 15 час. 00 минут на заседании специализированного совета Д. 024. 04. 01 по приему диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при ордена Ленина Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте по адресу: 199226, Ленинград, ул. Беринга, 38.

Средств в двух  
леть по указанному

С диссертацией  
антарктического нау

Автореферат

Ученый секрет  
специализированного  
доктор географичес

### ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Основные направления развития науки и техники в интересах экономического и социального прогресса страны, формирования в директивных документах, предусматривают комплексное изучение Мирового океана и атмосферы в настоящее время и на перспективу. В морях полярных областей одним из наиболее важных объектов такого изучения является ледяной покров, строение и сезонности пространственного распределения ледяного покрова, его сезонная и межгодовая изменчивость объективно отражал процесс, происходящие в океане и атмосфере, особенности их взаимодействия, климатические изменения. Наличие ледяного покрова оказывает существенное влияние на все виды народнохозяйственной деятельности в морях полярных областей (гидрометеорологическое строительство, судноходство и т.д.). Таким образом, выявление и уточнение закономерностей формирования ледяного покрова, его пространственно-временной изменчивости и возможного влияния на практическую деятельность с учетом современного уровня развития науки и техники является актуальной проблемой.

Заметную роль при ее решении играет изучение процессов, прямо или косвенно связанных с внутриводным ледообразованием. Так по материалам наблюдений в отдельных районах полярных морей внутриводный лед может составлять 70-80% (а в некоторых димамических районах и все 100%) от общей толщины ледяного покрова. В результате многолетних исследований как в нашей стране, так и за рубежом выявлен ряд основополагающих закономерностей формирования, роста и распространения внутриводного льда в пресных и морских водоемах. В последние годы предприняты попытки аналитического описания этих сложных природных процессов. Тем не менее, по-прежнему,

ВНУТР  
№: 1 2117

Библиотека

оставается много нерешенных задач, обусловленных сложностью изучения процесса переохлаждения воды и формирования внутриводного льда как в природных, так и лабораторных условиях. Так в ряде случаев при исследовании этих процессов отсутствовали их точные физические характеристики, которые плохо поддаются аналитическому описанию, по-видимому, не до конца вскрыты и все физические механизмы внутриводного левообразования, практически отсутствовали данные о связи кристаллической структуры ледяного покрова, со-державшего прослойки внутриводного льда, с особенностями термокапильного распределения в поверхностных слоях моря, которое является важным критерием при изучении физических механизмов формирования внутриводного льда и т.д.

Цель настоящей работы - экспериментальные и натурные исследования физических механизмов переохлаждения воды и формирования внутриводного льда и изучение их роли в формировании кристаллической структуры ледяного покрова арктических и антарктических морей на примере конкретных акваторий этих регионов. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные задачи:

- выявление основных факторов, обуславливающих возможность переохлаждения природных вод;
- лабораторные исследования переохлаждения воды и формирования внутриводного льда для получения и уточнения основных физических характеристик этих процессов;
- исследование роли конкретных механизмов переохлаждения воды и образование внутриводного льда в формировании строения ледяного покрова морей полярных областей на примере Карского моря в Арктике и моря Девильса в Антарктике;

- лабораторные исследования физического механизма формирования "активного" внутриводного льда, приводящего к омерзанию подводных частей гидротехнических сооружений и образованию ледяного льда;

- теоретические, лабораторные и натурные исследования физического механизма возникновения явления обильности судов в море.

Фактический материал. Основным исходным материалом для работ послужили результаты экспериментов, проведенных автором в лаборатория физического моделирования АННИИ, экспериментальных исследований на в/л "Сибирь", "Ленин" и "Арктика" в период с 1985-1989гг, а также акваторий экспедиции в Карском море, в которых автор принимал непосредственное участие. При анализе результатов и обосновании выводов широко использованы также данные, опубликованные в советской и зарубежной печати.

Методы исследований. При решении поставленных задач автором использован комплексный подход, предусматривающий моделирование исследуемых процессов в лабораторных условиях, проведение натурных наблюдений с применением нестандартной измерительной аппаратуры высокого разрешения. Структурный анализ ледяного покрова проводится по методике, разработанной в АННИИ. При решении аналитических задач использованы известные физические модели теории левообразования.

Научная новизна:

- на основании теоретических и лабораторных исследований автором предложена физическая модель, объясняющая возможность переохлаждения природных вод;

- предложен и экспериментально подтвержден физический механизм переохлаждения воды вследствие конвекции в однородности по плотности слое моря при ограничении глубины конвекции.

- в результате лабораторных исследований уточнены физические характеристики процессов переохлаждения воды и формирования внутриводного льда;

- предложены теоретически и экспериментально подтверждены возможные физические механизмы формирования "активного" внутриводного льда и возникновения обледенения судов в море.

Практическая ценность работы. Научные результаты и методы изучения внутриводного ледообразования, представляющие в работе, могут быть использованы:

- при исследовании роли и масштабов внутриводного ледообразования в формировании и эволюции ледяного покрова в морях полярных областей;

- при разработке эффективных мер борьбы с формированием "активного" внутриводного льда, "облапанием" судов в море;

- для совершенствования лабораторных и натурных исследований процессов переохлаждения воды и внутриводного ледообразования;

- для дальнейшего изучения взаимодействия атмосферы и океана на основе ступенчатого анализа ледяного покрова в морях полярных областей.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на конференциях молодых специалистов АННИИ (1985), итоговом заседании физико-технической секции Ученого совета АННИИ (1987), на Всесоюзном совещании по гидрогенезу "Лед-87" (1987), научно-техническом семинаре отдела физики льда и океана АННИИ (1989).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 4 работы, одна работа находится в печати.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (127 наименований). Общий объем составляет 185 страниц и включает 3 8 рисунков и 7 таблиц.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна, практическая значимость работы, представлены основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена лабораторным исследованиям процесса переохлаждения воды, которое во многих случаях является необходимым условием для формирования внутриводного льда. Кратко анализируются результаты предыдущих исследований, на основании которых делаются выводы, послужившие автору отправной точкой в его исследованиях. К наиболее значительным из них можно отнести выводы, сделанные Э.Лангетом и Б.Нельсоном (1968), Т.Карстенсом (1966), А.Карле и др. (1956), которые считают, что скорость из основополагающих факторов, влияющих на величину переохлаждения воды, является скорость ее охлаждения. Однако отсутствие в этих работах анализа физических причин этой замкнутости, также как и удовлетворительного исследования возможности переохлаждения природных вод в целом; указав автору на необходимость проведения дополнительных лабораторных исследований, целью которых было:

1. Изучение возможности вестичин переохлаждения воды от концентрации солей, находящихся в ней понов минеральных веществ (кислота в виду нестатистированная и пресная вода) и солености при различных температурах, но идентичной скорости охлаждения.

2. Выявление физических причин переохлаждения как пресной, так и морской воды.

Результаты исследований автора показали, что величина переохлаждения воды зависит как от скорости охлаждения, так и от ее полного состава. Характерной особенностью хорошо согласующейся с

полученной ранее (Д.Л.СДЖ, 1956) закономерности изменения разности потенциалов, возникшей вследствие миграции ионов на границе твердой и жидкой фаз при разной скорости замораживания. На основании этих выводов автором предложена физическая модель пероохлаждения приростных вод, основным положением которой является зависимость процессов пероохлаждения воды и ее кристаллизации от соотношения между скоростью теплоотдачи и миграции ионов на периферии жидких льдоподобных молекул (кластеров). В случае, если скорость миграции ионов превышает скорость теплоотдачи, то формирующийся на периферии кластеров минерализованный слой будет предохранять их от преждевременной кристаллизации и вода будет пероохлаждаться. В противном случае начнется формирование кристаллов льда. Предложенная физическая модель хорошо объясняет основные результаты предыдущих исследований, выполненных различными авторами, а именно:

1. Морская вода при одинаковых условиях охлаждения пероохлаждается на большую величину, чем дистиллированная или пресная.
2. Величина пероохлаждения при динамических условиях охлаждения больше, чем при статических.
3. Стенки сосудов и наличие в воде примесей оказывают свое влияние на величину пероохлаждения воды только в том случае, если их форма и материал, а следовательно, и теплопроводимость приводят к неравномерному охлаждению контактирующего с ними слоя воды.

Во второй главе рассматриваются физические механизмы пероохлаждения воды и формирования внутриводного льда, которые могут оказывать существенное влияние на кристаллическое строение ледяного покрова арктических и антарктических морей. До недавнего времени были известны четыре таких механизма: тепловой, компрес-

сионный и концентраторный (Пехович А.И., 1983) и за счет "двойной диффузии" (Мартин С., Кауфман П., 1974). В одном из последних исследований, посвященных этому вопросу, рассмотрен еще один механизм формирования внутриводного льда: дисперсионный (Монахов Е.И., 1983). Тем не менее ни один из них нельзя считать до конца изученным, т.е. тем, для которого были бы известны изменения всех его физических параметров и установленны их количественные значения.

В этой связи в лаборатории физического моделирования АННИ, при непосредственном участии автора, проведен комплекс экспериментальных работ по изучению особенностей протекания и выявления физических характеристик различных механизмов формирования внутриводного льда.

Исследования механизма пероохлаждения воды и формирования внутриводного льда вследствие дифференциально-диффузионной конвекции при контакте трех и более слоев морской воды являлось как бы продолжением экспериментальных и теоретических исследований этого процесса, выполненных Мартином С. и Кауфманом П. (1974) и Монаховым Е.И. (1983) для двухслойной модели. При этом разрабатывая в лаборатории методику проведения экспериментов позволяющая с большей точностью измерять те физические параметры, которые наиболее трудно поддаются определению в натурных условиях, также, например, как величина пероохлаждения воды, толщина переходного слоя, количество формирующегося внутриводного льда, его пористость и т.д. Подойдя к механизму пероохлаждения воды имеет большое потенциальное значение в процессе формирования внутриводного льда. Наиболее существенные результаты лабораторных исследований в этом направлении затрагиваются в следующем:

1. В случае начала кристаллизации в самом верхнем слое при

величина переохлаждения менее  $0,1^{\circ}\text{C}$ , средние слои сохраняют свое переохлажденное состояние, величина переохлаждения которых достигает нескольких десятых градуса  $^{\circ}\text{C}$ .

2. Максимальные величины переохлаждения в случае конвективного теплообмена между слоями достигают  $1,5^{\circ}\text{C}$ , при чисто диффузионном —  $0,7^{\circ}\text{C}$ .

3. Интенсивность кристаллизации и количество образуемого внутриводного льда определяется величиной переохлаждения воды в слое. При величинах переохлаждения, не превышающих  $0,5^{\circ}\text{C}$ , процесс кристаллизации значительно растянут во времени и может длиться в течение нескольких десятков мин. и даже часов. При этом наблюдается сосуществование остаточной величины переохлаждения воды и кристаллов льда. При больших величинах переохлаждения кристаллизация длится от нескольких минут до нескольких секунд, когда практически весь переохлажденный объем воды заполняется кристаллами льда. И в том, и в другом случае величина пористости<sup>\*)</sup> внутриводного льда при статических условиях кристаллизации (без уплотнения) не превышает значения  $0,9$ .

4. При значительном ( $> 0,5^{\circ}\text{C}$ ) переохлаждении воды, возникшем вследствие конвективного теплообмена между слоями, внутренний лед целиком заполняет переохлажденный объем воды, что в внутренних условиях приводит к формированию гетерогенного льда льда В<sub>1</sub>, В<sub>8</sub>. При чисто диффузионном теплообмене между слоями и малых величинах переохлаждения формирующиеся кристаллы льда могут лишь нарушать рост конвекционного льда, т.е. способствовать формированию типа В<sub>3</sub>, В<sub>4</sub>.

\*) В данном случае под пористостью внутриводного льда понимается процентное содержание воды в смеси кристаллов льда и воды.

В лабораторных условиях автором исследован и другой механизм переохлаждения воды и формирования внутриводного льда, который обусловлен смешением пресной и морской воды, находящейся при своих температурах заморзани (концентрационный тип). Как известно, переохлаждение воды в данном случае обусловлено эндотермичностью процесса растворения солей морской воды при низких температурах (Миллеро Ф., Леунг Л., 1976). Теоретическому исследованию этого процесса посвящено несколько работ, результаты которых значительно отличались друг от друга (Петрович А.И., Шатагина И.Н., 1970, Монахья Е.И., 1989). Это и вызвало необходимость моделирования этого процесса в лабораторных условиях. Эксперименты проводились в рабочей емкости, объемом около 80 л, в которой смешивались различные объемы пресной воды и водного раствора  $\text{NaCl}$ . Величина переохлаждения смеси определялась ковшным путем по количеству формирующегося внутриводного льда, которое определялось калориметрическим способом. Результаты экспериментов показали довольно хорошую сходимость с ранее выполненными теоретическими расчетами (Петрович А.И., Шатагина И.Н., 1970, тавр. I). Кроме этого автором были проведены расчеты величин переохлаждения при смешении пресной и морской воды с учетом теплот растворения солей морской воды при низких температурах (Миллеро Ф., Леунг Л., 1976).

Таблица I

Величина переохлаждения смеси в  $^{\circ}\text{C}$ , образовавшейся в результате смешения различных объемов соледержащих растворов ( $M_2$ ) с пресной водой ( $M_1$ ), находящаяся при температурах заморзани.

$M_1/M_2$	0	0,1	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	3,7
вид смеси								
$\text{NaCl}$ экв.	0	0,030	0,052	0,047	0,038	0,023	0,010	0
морская вода расчет	0	0,034	0,060	0,070	0,066	0,036	0,007	0

В работе предложен и экспериментально подтвержден физический механизм переохлаждения воды и формирования внутриводного льда в результате осенне-зимней конвекции в случае ограничения развития этого процесса по глубине. Такое ограничение может быть обусловлено как малыми глубинами моря, так и ярко выраженной плотностной стратификацией, когда дальнейшее понижение температуры опорожденного по плотности слоя воды не приводит к дальнейшему увеличению его толщины. В натуральных условиях это явление, по-видимому, может наблюдаться в двух случаях:

1. В период осеннего выхолаживания, когда толщина конвекции достигла дна или слоя пикноклина, а температура воды не достигла еще точки замерзания.

2. В зимний период при возникновении разрывов в ледяном покрове и относительно спокойных гидрометеорологических (малых скоростях ветра и дрейфа). В этом случае (по данным Франческини Г., 1963 и Катсароса К., 1975) на поверхности чистой воды может возникнуть переохлажденная пленка толщиной несколько мм, препятствующая процессу кристаллизации на поверхности разрыва.

Проведенные автором лабораторные эксперименты показали, что при конвективном охлаждении однородного по плотности столба морской воды, температура которой выше точки замерзания, нижние его слои охлаждаются быстрее чем верхние. Это приводит к ступенчатому распределению в нем температуры воды, в результате чего нижние слои оказываются переохлажденными на величину  $0,05-0,08^{\circ}\text{C}$  к тому моменту, когда температура самого верхнего слоя достигнет точки замерзания.

Этот процесс может происходить и в зимний период при образовании участков чистой воды (трещины, полыньи, разводья и т.д.). В этом случае физический механизм переохлаждения воды будет нес-

колько отличаться от предыдущего тем, что конвективный процесс будет происходить в слое воды уже охлажденном до точки замерзания. С физической точки зрения это возможно только в том случае, если на поверхности формируется переохлажденная пленка (Франческини Г., 1963, Катсарос К., 1973), предохраняющая поверхность слоя воды от кристаллизации. Тогда и здесь становится возможным ступенчатое распределение температуры в первоначально однородной охлажденной до точки замерзания толщине воды. Существенным же ее отличием от распределения температуры рассмотренного выше явления будет увеличение значения переохлаждения с глубиной, а наличие максимума переохлаждения в самом верхнем и в самом нижнем слоях водной толщи. При этом максимум переохлаждения в самом верхнем слое объясняется тем, что конвективный процесс происходит в воде уже охлажденной до точки замерзания, поэтому при движении температурного равновесия на границе верхнего и нижележащих слоев первый из них будет уже переохлажден, причем на довольно значительную величину, несколько десятых градуса (Франческини Г., 1963, Катсарос К., 1973). Вертикальное распределение температуры воды, полученное в результате теоретических и лабораторных экспериментальных исследований, хорошо подтверждается и в натуральных условиях как в Арктике (результаты исследования НИИ "О.Шлигта"), так и в Антарктике (Дюбкин И.А., Топоров Л.Г., 1970). В свою очередь приведенный в работе расчет показывает, что при скорости ветра менее  $10 \text{ м/сек}$  и тепловых потоках с открытой водной поверхности  $150-500 \text{ Вт/м}^2$ , величина переохлаждения в поверхностном слое может достигать  $1,2^{\circ}\text{C}$  при скоростях конвекции  $10^{-4} - 10^{-3} \text{ м/сек}$ .

Дальше главы посвящена исследованию роли внутриводного льда в стратиграфических исследованиях ледяного покрова в южных Арк-

тики и Антарктики на примере Карского моря и моря Лейвнса. По мнению автора, структурный анализ ледяного покрова является важным ковенным методом исследований гидрометеорологических процессов, особенно в труднодоступных районах морей поллярных областей. Известно, что по содержанию прослоек внутривойдного льда можно определить время динамических подыжек оледенетого ледяного покрова (Черепанов Н.В., 1964), возраст многолетнего льда (Черепанов Н.В., 1957). Учитывая многообразие механизмов формирования внутривойдного льда, его содержание в ледяном покрове при определенных условиях может также служить критерием величины переохлаждения воды, ставянная пресных фалых вод с ледянков, массы подни- мающихся в поверхностные слои глубинных вод и т.д. Для того, чтобы он служил таким критерием необходимо установление корреляционных зависимостей между значеннями его массы и объема в ледяном покрове и теми гидрометеорологическими факторами, которые обуславливают его формирование. В качестве примера в работе приведены расчет величины температуры воздуха и скорости ветра над разрывом в ледяном покрове по содержанию прослоек внутривойдного льда, находящейся от него на расстоянии нескольких километров. При этом предполагается, что теплоотдача над разрывом происходит за счет турбулентного теплообмена и эффективного излучения, а все отнятое тепло идет на переохлаждение воды в результате конвективного перемешивания поверхностного слоя моря. При этом величина пористости внутривойдного льда принята равной 0,9, что соответствует результатам лабораторных исследований автора прочесного возмездия таких динамических факторов как ветер, волнение, течение и т.д. Результаты расчета показали, что при содержании

в ледяном покрове 15-сантиметровой прослойки внутривойдного льда на расстоянии 5 км от трещины или подлины при ее наличии в течение 48 часов средняя температура воздуха над ней была - 5 °С при скорости ветра 6 м/сек. При этом для определения величины переохлаждения воды в зависимости от удаления от подлины или трещины использовалась формула вида (Чиковский С.С., 1971)

$$\Delta T_{\text{пер}} = \Delta T_{\text{н.с.}} \cdot \kappa^L \quad (1)$$

где  $\Delta T_{\text{пер}}$  - величина переохлаждения воды при удалении ее от источника образования на расстоянии L км;

$\Delta T_{\text{н.с.}}$  - величина переохлаждения воды в верхнем 10-20 метровом слое подлины;

$\kappa$  - эмпирический коэффициент, равный 0,023.

Несомненно, что приведенный расчет является довольно приблизительным, поэтому для более подробного использования метода структурного анализа ледяного покрова необходимо дальнейшее изучение взаимосвязи между количеством внутривойдного льда и величинами гидрометеорологических факторов, при которых он формируется.

Результаты исследований последних трех десятилетий убедительно показывают, что содержание внутривойдного льда в ледяном покрове арктических и антарктических морей может достигать довольно значительных величин, особенно в наиболее динамичных участках моря: в районах западных подлин, устьевых участков рек, ледников, где ледяной покров может состоять из льда типа Б7, Г3 (Черепанов Н.В., 1976). В связи с этим на основании examination данных о кристаллической структуре ледяного покрова Карского моря в Арктике и зоны притаяния моря Лейвнса в Антарктике, а также с учетом новейших гидрологических данных, полученных автором при экспедиционных работах в Карском море, на-



гладко представляется взаимосвязь между функционированием различных механизмов переохлаждения воды и формирования внутриводного льда и соответствующими им изменениями в структуре ледяного покрова этих регионов в различные сезоны года. Так, например, вышесказанной теории расчет показывает, что слой весенне-летнего внутриводного льда в прибрежном море Девкиса в районе станции Митриной может формироваться за счет таких пресных вод с нижней и верхней поверхности близлежащих ледников, которые, смешиваясь с морской водой, формируют как мелкие хлопчатые кристаллы размерами 1-5 мм, так и крупные пластины льда с диаметром до 10-12 см.

Четвертая глава посвящена исследованным процессам "активности" и "пассивности" внутриводного ледообразования "активно-гидротехнических сооружений и формирования донного льда, еще в начале века послужила толчком к проведению дополнительных исследований этого процесса при участии Петербургского водного вода. В процессе этих исследований Енисеевым В. А. (1908) было установлено, что при наличии открытой водной поверхности в эльдинский период в пресных водоемах вода в них может переохлаждаться на величину 0,04-0,06 °C. В дальнейшем возможность переохлаждения пресной и морской воды в лабораторных и природных условиях исследовалась в работах Альберта В. К. (1939), Чижова А. Н. (1962), Умано С и Кавасаки С. (1959), Карстена Г. (1966), Тесагера В. (1966) и др.

Однако результаты всех этих исследований не дают ответа на вопрос, в каких же случаях кристаллы внутриводного льда ведут себя "активно", т.е. констатируют с поверхности случайных в одну сторону и элементов дождя водоема, а в каких наоборот в одну сторону во взвешенном состоянии. Частично ответом на поставленный вопрос

является исследование Девкиса О. (1948), который считал, что "активность" внутриводного льда проявляется только в переохлажденной воде. Однако физический механизм этого орошения внутриводного льда остается до сих пор невыясненным.

Визуальные исследования "активного" внутриводного ледообразования в пресной воде показали:

1. В пресном потоке процессе кристаллизации может происходить при сохранении остаточной величины переохлаждения воды в диапазоне 0,05-0,10 °C.
2. В потоке происходит незначительный подъем кристаллов от дна и стенок лотка, а также от поверхностей помещенных в него предметов.
3. Отсутствие незначительного заноса кристаллов льда вглубь потока.
4. Отсутствие видимых источников холода для формирования "активного" внутриводного льда.

Последний вывод показал необходимость рассмотрения этого процесса с точки зрения гидромеханики. Так георегистивский анализ плоскопараллельного движения под действием силы тяжести показывает, что величина работы совершаемая по переносу единичного объема воды вдоль поверхности раздела твердой и жидкой фаз равна диссипации кинетической энергии на данной поверхности, т.е.

$$A = D = \frac{(\rho g \sin \alpha)^2 \cdot h}{3 \mu} \quad (2)$$

При этом происходит необратимый переход кинетической энергии в тепло, что должно приводить к пульсационным изменениям температуры. Вышесказанный расчет по формуле (2) показывает, что при движении единичного объема воды со скоростью 18 см/сек за 1 сек

его температура должна повыситься на величину  $10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$ . Такая же величина получается и при расчете по формуле Богословского П.А. (1950), приведенной им для расчета потерь тепла за счет трения в трубопроводах в виде:

$$Q_{тр} = \frac{1}{2} \rho v^2 \lambda \frac{L}{d} \quad (3)$$

Однако в действительности пульсационные изменения температуры воды происходят не в сантиметровом, а более толстом слое. Для определения его толщины автором выполнены специальные измерения пульсаций температуры воды. Для этой цели к обыкновенной перекладочной порожком стальной емкости прикрепился термистр МТ-54, о помощи которого и разглашавшаяся истинные значения кодабанд температуры воды. (К металлургическим приборам термистр при мерзает и оказывается нечувствительным к изменениям температуры воды). Результаты измерений показали, что типичные значения пульсаций температуры воды происходят в диапазоне  $0,001-0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$ , что свидетельствует о том, что они происходят в слое толщиной порядка  $10^{-4}$  см. Учитывая, что радиус термометрически равновесного вращающегося составляет  $4 \cdot 10^{-7}$  см, то такая толщина пленки воды оказывается вполне достаточной для формирования в ней переносных кристаллов льда.

В результате вышесказанных исследований автором была сформулирована концепция о физическом механизме формирования "активного" внутриморского льда, которая заключается в следующем. При движении перемещающегося потока на поверхности пахоловских впадин происходит непрерывная диссипация кинетической энергии, приводящая к пульсационным изменениям температуры в тонком слое воды. При этом, если скорость его охлаждения в результате этих пульсаций оказывается выше критической, то в со-

ответствии с данными ранее проведенных исследований (гл. I), в нем начнется процесс формирования "активного" внутриморского льда.

В главе V представлены результаты лабораторных и натурных исследований процесса обледенения судов в море, выполненных сотрудниками лаборатории физического моделирования АНМИ при непосредственном участии автора. Обледенение корпуса судов относится к особо опасным природным явлениям в холодный период года. Вопросы распространения этого явления в морях поларных областей и особенностей его возникновения посвящены работы Воеводина В.А. (1973, 1981), Вол А.А., Конова Б.П., Леднева В.А. (1987), Рослика Я.Ф. (1984, 1988). И тем не менее механизм возникновения обледенения корпуса судов еще недостаточно ясен. До недавнего времени это явление изучалось лишь визуально с борта судна с последующей статистической обработкой тех гидрометеорологических параметров, при которых оно наблюдается. Однако их диапазон оказывается настолько велик, что они не в состоянии прояснить те физические процессы, которые являются первопричиной данного явления. Статистическая обработка результатов многолетних наблюдений, выполненная Афанасьевым Н.М. (1987), показала, что вероятность возникновения этого явления в осенне-зимний и начале весеннего периодов на участке трассы от о. Колгуев до Диксона практически одинакова. Многообразие гидрометеорологических факторов, при которых обледенение и его равновероятность на таком значительном участке трассы Северного морского пути привело к необходимости моделирования этого явления в лабораторных условиях.

Результаты экспериментов, проведенных в лаборатории физического моделирования АНМИ, показали:

1. Интенсивное "обледенение" корпуса модели возможно только при наличии перемещающегося льда.

2. С увеличением скорости движения модели при наличии переохлаждения воды интенсифицируется обильность увеличения.

3. Кристаллы внутриводного льда являются основным цементующим материалом при возникновении обильности судна.

4. Механизм обильности кордуса модели зависит от характера ее поверхности. Обильность ровной поверхности модели возможно только в переохлажденной воде. При наличии на ее поверхности каких-либо язвочек (трещин, отверстий), которые сконцентрированы по размерам с кристаллами внутриводного льда и, вследствие этого, препятствуют их свободному движению, в этом случае при попадании в них кристаллов льда силы сцепления между последними могут оказываться достаточными для возникновения обильности и при отсутствии переохлаждения воды.

Результаты лабораторных экспериментов были частично подтверждены при выполнении натурных исследований механизма обильности кордуса ледокола, проведенных на а/л "Сибирь", "Ленин" и "Арктика", которые позволили сделать следующие основные выводы:

1. Отсутствие аномальных распределений температуры кордуса в районе ватерлинии и электрического эффекта взаимодействия кордуса ледокола со льдом в момент формирования ледовой "подушки" свидетельствуют о малой вероятности влияния этих двух факторов на инициирование и развитие этого явления.

2. Отсутствие переохлаждения воды в однородном по плотности поверхностном слое моря во всех случаях возникновения обильности подтвердило возможность формирования ледовой "подушки" без этого энергетического фактора взаимодействия кордуса ледокола со льдом. (Переохлаждение воды было обнаружено только при явном выраженной плотности стратификации поверхностных слоев моря).

3. Мощные слои внутриводного льда толщиной 1-3 метра, обиль-

руженные под ледяным покровом, во всех случаях формирования ледовой "подушки", а также большее его количество (около 90%) в ледовой "подушке" подтвердили результаты лабораторных экспериментов о том, что именно внутриводный лед является основной составной частью этого ледового образования.

4. Ярко выраженное термодинамическое расслоение в подледном слое внутриводного льда с диапазоном изменения солёности 6-7 ‰ и температурой 0,3-0,4 °С является единственным постоянным гидрометеорологическим фактором, содействующим образованию ледовой "подушки", который может инициировать ее формирование.

Проведенные лабораторные исследования показали, что ледовая "подушка" может образовываться в однородном потоке морской воды с дугой при положительной температуре воздуха, т.е. при отсутствии каких-либо термических причин взаимодействия кристаллов льда с кордусом модели. Иницирующим началом при этом может служить какая-либо щель или отверстие, куда могут попадать кристаллы шуги. Учитывая, что в кордусе ледоколов как "Арктика" имеется порядка 120 отверстий, можно предположить, что любое из них, находясь в носовой или мидельной части, может служить источником возникновения обильности. Подтверждением правдивости предположения автором физического механизма этого явления, могут служить результаты ранее проведенных исследований.

Так по данным исследований Хоббса П. и Мейсона В. (1964), Ларена Д. и Саундера Р. (1967), Холкера Д. и др. (1967) при контакте двух пресных ледяных сфер диаметром несколько см между ними возникают силы взаимодействия в случае, если расстояние их радиуса не превышает 1-10 м. Лабораторные эксперименты Никитий У. и Мансумого А. (1954) показали, что контакт между двумя ледяными сферами при их взаимодействии является жидким. Не проводя теор-

рельефского анализа многообразия типовез о физических причинах этого взаимодействия, изложенных в работе Хоббса П. и Майсона Б. (1964), в данной работе физический механизм этого процесса рассмотрен с позиций изменения свободной поверхностной энергии систем, происходящей в результате взаимодействия соотвечающих ее компонентов. Для проведения такого анализа использовалась формула Дарьягина Б.В. и Кротовой Н.А. (1949) для определения силы взаимодействия двух сфер

$$N_s = 2\sqrt{\frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2}} (\delta_{1,2} \cdot d_{2,1} - \delta_{2,1})$$

Результаты экспериментов Хослера К. и др. (1957) показали, что если взаимодействие кристаллов льда с учетом площади контакта можно считать 2-3 кг/см<sup>2</sup>. С учетом того, что в солонном льду, по данным Хоббса П. и Майсона Б. (1964), рост начинается между кристаллами происходит в течение 1-2 мин., в то время, как в пресном в течение нескольких часов, автором предложена схема образования ледовой "полужиты", которая включает несколько этапов:

1. При вхождении ледокола в ледяной слой пути происходит падение кристаллов льда в его корушине отверстия.
2. Уплотнение пути и возникновение пнемоного взаимодействия между кристаллами.

3. В результате выхода взаимодействующих кристаллов за пределы отверстия происходит доковой и продольный рост ледовой "полужиты" до тех пор, пока расстояние между кристаллами в результате уплотнения не превысит критического значения.

В заключении изложены основные результаты проведенных исследований, наиболее значительная часть которых сформулирована в разделе "научная новизна", отмечены наиболее важные из нерешенных вопросов в процессе этих исследований и предложены перспективные пути их решения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Монахов Е.И., Тышко К.П. Внутриводный лед // Вестникальная структура и динамика приледного слоя океана / Под ред. Л.А.Тимохова. -Л.: Гидрометеоздат, 1989. -с.44-50.
2. Черепанов Н.В., Назинцев В.Л., Тышко К.П. Особенности внутриводного ледообразования в прибрежных районах моря // Ледо-термические проблемы в сев.тировете.стр-ве и вопр.продления навигации: Матер. II Всес.науч.-техн.совещ., Архангельск, 25-27 июля, 1987. -Л.: 1989. -с.77-80.
3. Тышко К.П., Назинцев В.Л. Об "активном" и "пассивном" внутриводном ледообразовании // Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. В.В.Богородского и В.П.Газарило. -Л.: Гидрометеоздат, 1989. -с.135-143.
4. Черепанов Н.В., Назинцев В.Л., Тышко К.П. Контактное переохлаждение воды и внутриводное ледообразование в море. // Электрофизические и физико-механические свойства льда. / Под ред. В.В.Богородского и В.П.Газарило. -Л.: Гидрометеоздат, 1989. -с.124-134.
5. Тышко К.П., Дьяггин Н.А. Ледорагторные исследования пористости внутриводного льда, формирующегося при статическом ледообразовании. - Тр.//МНИИ, 1990. -т.423, - с.141-145.

*Тышко К.П.*

Фот.Ал.ИНИ Зап.130 тираж 100 экз.  
 Подписано к печати 21.05.90 М-18989  
 Уч.изд.л.1,0 Воспитателю.