

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА
«ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОДДЕРЖКА ИНТЕГРАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ НА 1997 — 2000 ГОДЫ»

И.А.Степанюк, В.Н.Смирнов

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ
ХАРАКТЕРИСТИК
ДИНАМИКИ
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА



Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2001

УДК 551.46+574.58

Рассматривается совокупность принципов измерений, методик и технических средств, используемых при натуральных океанологических экспериментах по изучению деформационных процессов в припайных и дрейфующих льдах.

Книга предназначена для специалистов и аспирантов, а также в качестве пособия для студентов старших курсов гидрометеорологических специальностей.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997 — 2000 годы».

М $\frac{1805040600-20}{069(02)-2001}$

ISBN 5-286-01421-6

© Центр «Интеграция», 2001 г.
© И.А.Степанюк, В.Н.Смирнов, 2001 г.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики морского ледяного покрова как любой естественной среды изменчивы во времени. Это и составляет сущность понятия *динамика ледяного покрова*. Однако эта изменчивость чрезвычайно разнообразна, и в понятие динамики в широком смысле может входить *термодинамика*, *динамика солевого состава*, *кристаллодинамика* и т. д. Тем не менее отмеченные процессы, несмотря на наличие в названиях термина *динамика*, традиционно относят к *физике льда*, а более общем случае — к физике ледяного покрова. Под “чистой” динамикой преимущественно понимают изменчивость во времени *расположения элементов льда и ледяного покрова*. При этом внутренние изменения *взаиморасположения* элементов льда как некоторой упругопластической (в частном случае — чисто упругой) среды могут описываться как деформационные процессы *во льду* (деформации льда). Изменения расположения элементов ледяного покрова (отдельных льдин) целесообразно рассматривать как *деформации ледяного покрова*.

Деформационные процессы во льду можно отнести к явлениям *малого* масштаба. Их экспериментальное изучение требует применения весьма специфических измерительных средств. Причем эта специфика, как и в любой океанологической измерительной технике, сосредоточена на стыке между изучаемой средой и собственно измерительными узлами и обычно предопределяет конструкцию и физическую сущность чувствительных элементов и первичных измерительных преобразователей применяемых средств измерений (СИ).

С деформационными процессами во льду тесно связано понятие *сжатий* ледяного покрова. Установившееся значение этого термина значительно уже, чем применяемое в данной работе. Под *сжатием* обычно понимают обобщенную характеристику напряженного состояния дрейфующих льдов сплоченностью 9—10 баллов. Однако в практике морских операций термин *сжатие* уже давно применяют к припайным льдам (ледокольные проводки судов в припае, операции по выгрузке транспортных судов через припай), понимая под ним напряженное состояние припая, проявляющееся через признаки воздействия на прокладываемые в припае каналы и на технические сооружения, находящиеся в припае. Ситуация с *измерениями* характеристик сжатий в настоящее время терминологически еще не установилась [71—76, 80, 81, 91—95]. Поскольку принципы измерений, закладываемые в разрабатываемые методы, преимущественно основаны на связях с действующими механическими напряжениями, то инструменталь-

ное картирование сжатий здесь рассматривается как аналог инструментального картирования распределения механических напряжений.

Следует отметить, что при всей связанности этих двух физических понятий: *механические напряжения* и *деформации* в измерительных задачах авторы однозначно считают приоритетным понятие *деформаций*, поскольку деформаций — это те конкретные физические величины, которые подлежат так называемым *прямым измерениям* [32—36]. Лишь в ситуации со сжатиями, как отмечено выше, авторы решили изменить приоритеты.

В термине *деформации ледяного покрова* можно установить некоторое внутреннее деление, весьма полезное при рассмотрении с точки зрения измерительных задач. А именно: полезно отдельно рассматривать *дрейф льда* как изменение расположения льдин и массивов ледяных полей относительно географических координат (крупномасштабные деформации ледяного покрова), а также — *подвижки льда* как изменения *взаиморасположения* элементов ледяного покрова (участков припайного льда относительно друг друга, отдельных льдин в массиве дрейфующего льда и таких выделяющихся из ледяного покрова образований, как стамухи, шельфовые ледники и т.д.).

Термин *дрейф льда* является довольно привычным понятием в океанологии [41, 69, 89] и, по-видимому, не требует специальных пояснений. Однако применительно к измерительным задачам существует ряд важных особенностей. Действительно, временные и пространственные масштабы *дрейфа льда* таковы, что каких-либо специальных измерительных средств для его регистрации не нужно: в той или иной мере здесь используются стандартные средства и методы [11, 16—18, 96—98, 101—104, 109]. В частности, обычно используются изображения акваторий в оптическом, ИК или СВЧ диапазонах, получаемые с искусственных спутников Земли (ИСЗ), а также аналогичные инструментальные изображения или визуальные съемки, получаемые с самолетов стратегической ледовой разведки [13, 14, 22, 38, 40]. В целом дрейф льда может быть отнесен к деформационным процессам *больших* масштабов.

Подвижки льда как вид деформаций ледяного покрова является весьма специфичным. Во-первых, с позиций физики, поскольку при физическом рассмотрении подвижек требуется учитывать особенности деформаций больших пластин льда со всеми их внутренними неоднородностями (припайный лед) либо особенности их поведения во взаимодействии между собой (дрейфующий лед), т.е. необходим переход к *средним масштабам* деформаций (меньшим, чем *дрейф льда* и большим, чем *деформации льда*). Во-вторых, с позиций задач измерений, поскольку, например по сравнению с непосредственно деформациями льда, при измерениях подвижек должны применяться принципиально иные (нестандартные) методы и средства измерений соответственно с иными метрологическими свойствами (диапазоном измерений, погрешностями измерений и т.д.). В то же время стандартные средства и методы тоже применимы, хотя и в ограниченной степени. Действительно, при наблюдениях с ИСЗ или самолетов разведки чрезвычайно трудно выделить характерные

для подвижек масштабы изменчивости взаиморасположения элементов ледяного покрова из-за сравнительно большой временной дискретности получаемых данных (это рассмотрено в соответствующих разделах данной работы). И если для задач определения подвижек дрейфующих льдов (деформаций ледяного покрова) еще существуют некоторые варианты применения стандартных средств и методов, то применительно к припайным льдам становятся необходимыми только *специальные методы измерений*.

Здесь рассматриваются преимущественно *специальные средства и методы* получения информации о характеристиках динамики ледяного покрова в силу того, что оно предназначено для учащихся старших курсов институтов и университетов (специалистов, магистров), которые достаточно знакомы со стандартными средствами и методами. В результате при подготовке работы было сочтено нецелесообразным рассмотрение методик выявления характеристик дрейфа льда по данным самолетных разведок и ИСЗ, поскольку эти методики изучаются в таких основных учебных курсах как “Неконтактные методы океанологических исследований” и “Спутниковая океанография” (конкретные названия в различных ВУЗах могут различаться). Соответственно основное внимание было сосредоточено на рассмотрении методов и средств измерений характеристик деформационных процессов *среднего и малого масштабов*.

Какие-либо учебные пособия на эту тему в настоящее время полностью отсутствуют. Материал разбросан по различным отдельным публикациям. В специальных монографиях, посвященных изучению динамических процессов в ледяном покрове, преимущественно рассматриваются физические аспекты этих процессов. Следует лишь отметить монографию одного из авторов (В.Н.Смирнов. Динамические процессы в морских льдах. —СПб.: Гидрометеоздат, 1996), где в большом объеме рассматриваются результаты экспериментальных исследований и описаны методики и средства измерений. Однако описаны те методики и средства, которые непосредственно применялись при исследованиях, так что использоваться как обобщение по *измерительному* направлению отмеченная монография, естественно, не может.

Авторы понимают, что данная работа являясь первым таким обобщением, содержит много недостатков методического характера, которые авторы надеются выявить и впоследствии устранить. Введение и разделы 1.2, 1.3.2, 2.1, 2.2, 3.2, 4.1, 4.2 написаны И.А.Степанюком, разделы 1.1, 1.3.1, 3.1. написаны В.Н.Смирновым.

Авторы выражают благодарность: заведующему кафедрой океанологии СПбГУ В.В.Ионову, профессору кафедры океанологии СПбГУ В.Р.Фуксу, главному метрологу ГНЦ РФ ААНИИ В.М.Тимецу и руководителю ледового бассейна ЦНИИ им. акад. Крылова старшему научному сотруднику К.Е.Сазонову за полезные замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Издание подготовлено в рамках ФЦП “Интеграция”, проект М141-05.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

1.1. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МОРСКИХ ЛЬДАХ

1.1.1. Механика деформируемого льда

Морской лед подразделяется на подвижный *дрейфующий* лед и неподвижный — *припай*.

Дрейфующий лед может быть в виде полей размерами от 20 м в поперечнике до 10 км и более, а также в виде обломков льда.

Припай образуется вдоль побережья, между островами и севшими на мель торосами и айсбергами. Припай может простираться в направлении открытого моря на несколько сотен километров.

Формы *деформирования и разрушения* ледяного покрова можно разделить на *термические и динамические*. На рис. 1 представлена обобщенная схема форм разрушения льдов при различных ситуациях [70].

Термические трещины образуются при изменении температуры верхних слоев ледяного поля (см. рис. 1 *а*). Если происходит сжатие верхних слоев, то трещины образуются на верхней поверхности, если нижних слоев, то — на нижней поверхности. Термическое расширение и сжатие происходит неравномерно из-за различной толщины льда и снега. Поэтому локальные термические напряжения образуют систему трещин, начиная от мельчайших “волосяных” и кончая сквозными.

Идеализированное представление комбинированной формы разрушения льдов за счет касательного напряжения ветра F_a и течений F_w показано на рис. 1 *б*. В этом случае образуется черепицеобразная поверхность ледяного покрова с параллельной системой трещин. На рис. 1 *в* показана изгибная деформация льда, обусловленная поверхностной волной. Изгибные напряжения сжатия и растяжения образуют во многих случаях параллельные трещины на расстоянии половины длины волны друг от друга.

При медленном сжатии тонкого слоя льда, ограниченного толстыми льдами (см. рис. 1 *г*), образуется волнистая поверхность. Это явление обусловлено потерей устойчивости формы ледяной пластины при упругопластическом деформировании льда. Торошение льдов сопровождается многими формами разрушения льда и сплачивания обломков в изостатически равновесное нагромождение (см. рис. 1 *д*). Гряды торосов характеризуют деформационные свойства ледяного покрова. Там, где имеется большой горизонтальный градиент скорости дрейфа, образуются гряды торосов сдвигового происхождения.

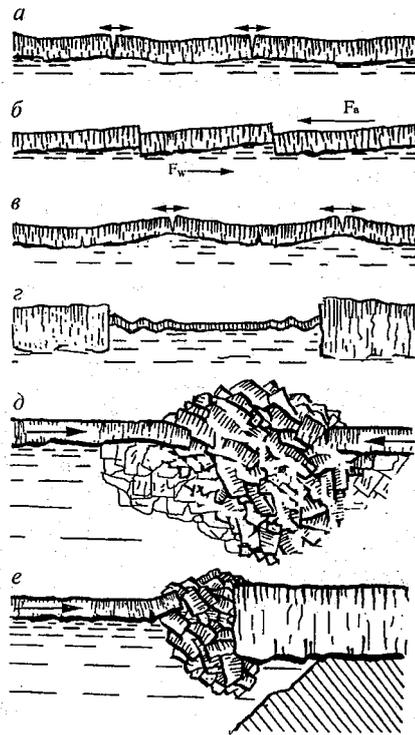


Рис. 1. Формы разрушения ледяных полей:

a — термический изгиб; *b* — идеализированное представление процесса деформирования льда силами ветра и воды; *в* — изгиб ледяного поля гравитационной волной; *г* — потеря устойчивости формы тонкого льда при сжатии и упругопластическом деформировании; *д* — образование тороса; *е* — торшение у вертикальной стенки

При торшении сравнительно тонких льдин происходят наползания и подсовы, образуется своеобразная “гребенка”. Вес льда в этом случае не равновешивается силами плавучести и вызывает изгибные напряжения, сопровождаемые напряжениями среза. В том случае, когда лед движется по неподвижному сооружению, айсбергу или крутому берегу возникает картина, изображенная на рис. 1 *e*. В результате торшения лед может набиваться до дна.

Взаимодействие дрейфующего ледяного поля с неподвижным объектом (айсберг, стамуха, сооружение и т.д.) сопровождается различными формами разрушения льда (рис. 2). Здесь можно увидеть разрушение потерей устойчивости, поперечным изгибом, дроблением (смятием, срезом). В результате прорезания ледяного поля образуется канал чистой воды и обломков льда (рис. 3).

В мелководных районах шельфовых морей большие ледяные поля и гряды торосов механически разрушаются при взаимодействии с берегами и мор-

ским дном. В случае, изображенном на рис. 4, дрейфующий ледяной остров, на котором располагалась станция “Северный полюс-19”, разрушился на несколько частей при пропахивании килем острова морского дна [70]. Лед проявляет широкий спектр механических свойств, присущих твердому телу: упругость (в том числе и нелинейную), вязкость, релаксацию напряжений, хрупкое разрушение, разрушение при ползучести и др.

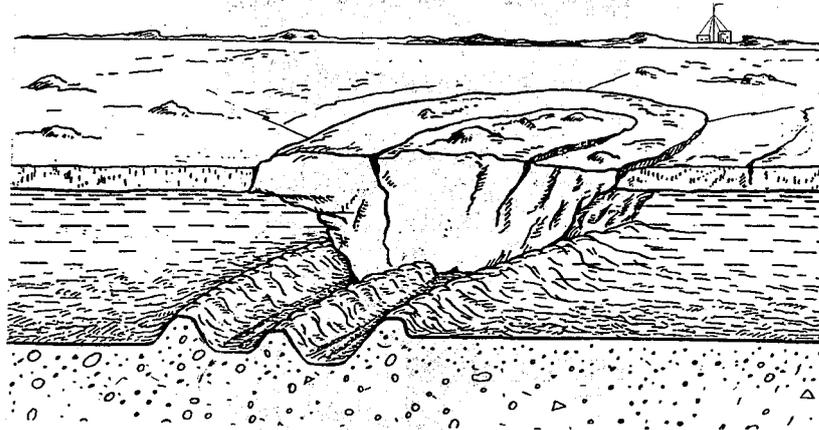


Рис. 2. Стамуха в припае Байдарацкой губы

Испытание льда под нагрузкой дает довольно ясную картину деформационного поведения льда. После приложения нагрузки во льду возникает мгновенная упругая (полностью обратимая) деформация. Далее лед начинает “течь”; процесс деформирования льда при этом характеризуется тремя видами прямой ползучести льда: первичной (переходной, замедля-

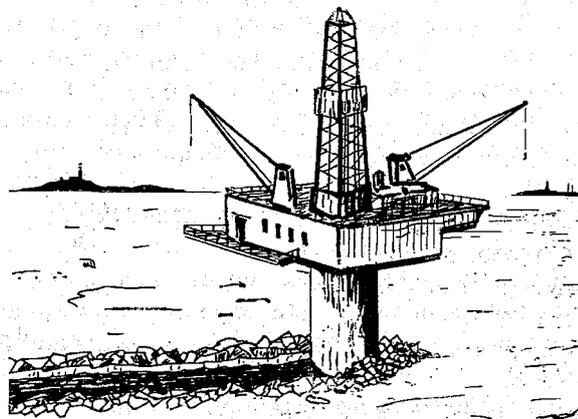


Рис. 3. Прорезание ледяных полей опорой буровой платформы

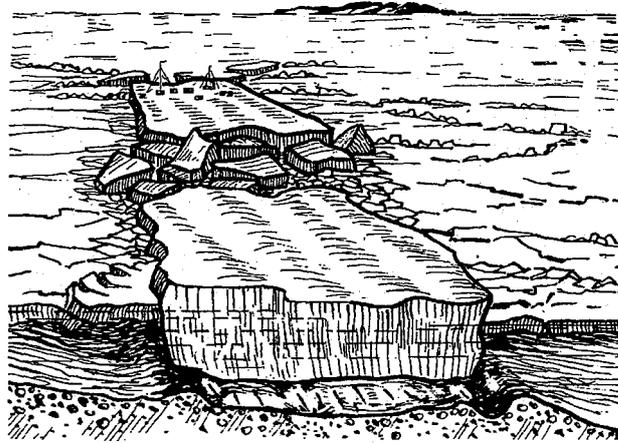


Рис. 4. Разрушение дрейфующего ледяного острова при взаимодействии с морским грунтом

ющейся, неустановившейся), вторичной (установившейся, устойчивой) и третичной (ускоренной, неустойчивой).

На этапе первичной переходной ползучести происходит вязкоупругая деформация. В экспериментах на релаксацию (при снятии нагрузки) мгновенная упругая деформация восстанавливается мгновенно, а замедленная упругая деформация восстанавливается, возвращаясь к устойчивому состоянию, постепенно (обратная ползучесть).

Вторичная ползучесть есть медленно протекающий переходный процесс между этапами замедляющейся деформации (деформационного уплотнения) и ускоряющейся деформации (деформационного разупрочнения). Скорость деформирования льда в этом случае постоянна. Третичная ползучесть характеризуется начальным ускорением, которое постепенно прекращается и скорость деформации стабилизируется.

На кривой зависимости напряжение — деформация ($\sigma - \epsilon$) наблюдается пик, соответствующий максимальному при данной скорости деформации напряжению σ_{max} . Механизм разрушения может быть:

- хрупким (в этом случае деформация в основном упругая);
- пластическим (деформация имеет диссипативный характер и неэрратима).

Значение относительной деформации — деформации разрушения имеет порядок 10^{-3} при пластическом разрушении и снижается до 10^{-4} в случае хрупкого разрушения под действием растягивающего напряжения и при высоких скоростях деформации. Исходя из деформации разрушения и данной скорости деформации, можно определить время до разрушения как критический элемент.

Прочность и динамика ледяного поля зависит от упругих свойств льда, определяемых модулем Юнга E , коэффициентом Пуассона μ , а также прочностью льда. Модуль Юнга изменяется в широких пределах в зависимости от содержания жидкой фазы во льду. Сейсмоакустическими измерениями на пресноводном и морском льду получен диапазон следующих значений. Для морского льда $E = (0,5—8) \cdot 10^3$ МПа; для пресного льда $E = (3—10) \cdot 10^3$ МПа. Коэффициент Пуассона μ является более постоянной величиной и изменяется в пределах $0,29—0,37$.

При небольших напряжениях деформация ползучести пропорциональна нагрузкам; при более значительных нагрузках линейность между нагрузкой и деформацией нарушается, и явление ползучести становится нелинейным.

Суммарная деформация в образце льда обычно представляется в виде [30]

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \dot{\varepsilon}_s t,$$

где ε_e — мгновенная деформация; ε_p — деформация переходного процесса (неустановившаяся ползучесть); $\dot{\varepsilon}_s t$ — деформация устойчивой ползучести.

Время, необходимое для того, чтобы остаточная деформация стала значительной, зависит от скорости приложения и продолжительности действия напряжения, а также от температуры и типа льда. Наблюдения временной зависимости обратной ползучести показали, что для льда не имеет места простая релаксация.

Наблюдения за деформациями льда показывают, что при постоянном напряжении (около 0,5 МПа) образуются внутренние трещины. Деформация к моменту первой трещины при напряжении около 1 МПа составляет $5 \cdot 10^{-4}$. Для напряжений, больших 10 МПа, можно ожидать хрупкий характер поведения с быстрым разрушением при деформациях около $1,5 \cdot 10^{-3}$. При напряжениях 1—10 МПа пластические деформации имеют диапазон $50—2,5 \cdot 10^{-3}$.

При изучении процессов естественного деформирования ледяных полей важно знать не только механические характеристики образцов льда но и, учитывая масштабный фактор, оценивать физико-механические свойства ледяных полей.

Простейшие измерения прогибов ледяного покрова под статической нагрузкой показывают, что в картине поведения льда отмечаются этапы мгновенного упругого прогиба, первичной и вторичной ползучести. При снятии нагрузки наблюдается обратная ползучесть с остаточными явлениями. Диапазон значений модулей упругости для пресноводных и морских льдов составляет $(0,5—10) \cdot 10^3$ МПа. Многообразие факторов, влияющих на физическую достоверность определения модуля, можно уменьшить, если пользоваться методами определения эффективного модуля упругости ледяного поля в натуральных условиях. По-видимому, приближение условий метода определения к условиям “работы” ледяных полей — торошение, воздействие льда на сооружение, ломка льда ледоколом — дают наиболее

достоверные значения модулей упругости. С этой целью предлагаются различные методики определения этих значений.

На основе решения задачи о центральном изгибе ледяной пластины на упругом основании имеем [71, 72]

$$P = \frac{8W_0k_0}{\lambda^2}; \quad \lambda = \sqrt{k_0D}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)};$$

где P — нагрузка; W_0 — прогиб под нагрузкой; k_0 — коэффициент упругого основания (воды).

Измеряются наклоны льда в чаше прогиба от сосредоточенной нагрузки. Зная наклоны льда на всей чаше прогиба, имеем

$$W_0 = \int_0^R \varphi(x) dx,$$

где R — радиус чаши прогиба; $\varphi(x)$ — наклоны; x — расстояние.

Методом приближенного интегрирования значение W_0 определяется с достаточной степенью точности. Например, при нагрузке $P = 120$ кН (трактор 12 т), $h_i = 2$ м, $2R = 180$ м, $W_0 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м, $k_0 = 0,0098$ МН/м³ модуль упругости будет $E_e = 2,4 \cdot 10^3$ МПа. На этом же участке ледяного поля были проведены измерения скоростей упругих волн и определен модуль Юнга (E); его значение оказалось в два раза больше ($E = 6 \cdot 10^3$ МПа), чем модуль E_e . При длительных нагрузках модуль упругости может уменьшиться во много раз, в этом случае его называют модулем деформации.

1.1.2. Механика разрушения льда и излучение упругих волн

Физико-механические свойства льда используются для расчета прочности ледяных полей в задачах инженерной ледотехники. В связи с масштабным эффектом имеет смысл рассмотреть физическую природу прочности льда и ледяных образований различного масштаба.

В настоящее время в проблеме прочности наметились две концепции: механическая и кинетическая [66].

Согласно механической концепции разрушение тела является результатом потери устойчивости твердым телом, находящимся в поле внутренних и внешних напряжений. В этом случае твердое тело рассматривается как сплошная среда, содержащая дефекты типа микротрещин, на краях (вершинах) которых под действием приложенных сил и образующихся при этом дополнительных внешних напряжениях возникают перенапряжения, которые могут во много раз превосходить среднее напряжение и достигнуть уровня теоретической прочности. В этом случае происходит катастрофическое разрастание трещины, тело разрушается на части. Приложенное среднее напряжение при этом соответствует критическому напряжению, или так называемой “технической” прочности образца. Величина критических напряжений определяется исходя из следующих соображений: тре-

щина растет тогда, когда изменение упругой энергии в образце за счет разгрузки материала вокруг растущей трещины равно или больше изменения свободной поверхностной энергии, возникающей при образовании новых поверхностей.

В кинетической концепции разрушение изучается не как критическое событие, а как результат процесса, развивающегося в материале во времени. Разрыв тела рассматривается как конечный этап постепенного развития и накопления субмикроскопических разрушений. Этот процесс развивается в напряженном теле под действием тепловых флуктуаций. Вводится понятие о долговечности под нагрузкой: о времени, необходимом для развития процесса разрушения от момента нагружения до его разрыва.

При разработке физических моделей, описывающих процесс взаимодействия ледяных полей и разрушение их поперечным изгибом, сжатием или потерей устойчивости, необходимо изучить кинетику процесса разрушения, а также условия излучения упругих волн. На основе кинетических подходов такое изучение проводится для различных твердых тел от элементарных разрывов до макроразрушения.

Согласно кинетической концепции, разрыв тела под нагрузкой есть результат временного процесса, развивающегося в материале под действием термических флуктуаций и механических напряжений. Длительность этого процесса от момента приложения напряжения до разрыва тела на части определяется величиной активационного барьера и температурой. Чем сильнее растянуто тело, тем больше снижается барьер и меньше времени требуется для разрыва. Характеристики предел прочности, предельное разрывное напряжение могут использоваться только как практически удобные, но они теряют смысл при суждении о физической природе прочности твердых тел.

В механике твердых тел при описании свойств реологических моделей применяется обычный в математическом анализе прием, когда значение одной переменной рассматривают при фиксированных значениях остальных переменных. С физической точки зрения определения ползучести льда и релаксации напряжений имеют только формальный смысл: и ползучесть, и релаксация напряжений есть не различные физические процессы, а различные стороны одного и того же физического процесса. Последний состоит в перегруппировке молекул и их комплексов в результате теплового движения к такому расположению, при котором энергия взаимодействия совокупности молекул и соответственно свободная энергия льда имеют минимальное значение. По этой причине в понятие о времени релаксации напряжений вкладывается и другой смысл — мера характеристического времени, по истечении которого вязкое поведение льда начинает преобладать над его упругим поведением.

Наблюдаемые сбросы напряжений в ледяных полях, а также эксперименты с нагружением льда в скважине и регистрацией напряжений на удалении от скважины показывают, что упругопластические деформа-

ции льда развиваются на определенном уровне уже имеющихся внутренних напряжений. Очевидно, что этот естественный уровень напряжений различен для различных льдов и зависит, в первую очередь, от плотности льда и его температуры. Под термином внутренние естественные напряжения следует понимать систему напряжений, которые могут существовать в равновесии внутри льда, когда к его поверхности не приложены внешние силы.

В отличие от лабораторных образцов крупномасштабные объекты разрушаются сложным образом, поэтому характеристика прочности объекта геофизического масштаба может быть определена уровнем напряжений в среде. В последнее время наметились пути сближения подходов, развиваемых для крупномасштабных и лабораторных объектов. При переходе к массивам льда необходимо проанализировать масштабные аспекты разрушения и деформирования льда не как сплошного тела, а как дискретной среды, характеризующейся при сдвиговом разрушении сцеплением и углом внутреннего трения. Физической причиной, обеспечивающей преемственность закономерностей разрушения при переходе с микроскопических на более высокие масштабные уровни, является концентрационный критерий укрупнения трещин. Этот критерий позволяет описать не только качественно, но и количественно переход от микро- к макроразрушению независимо от масштаба исследуемого объекта. Из-за микронеоднородности среды процесс неустойчивого трещинообразования локализуется в узких зонах, что приводит к образованию магистрального разрыва или полосы текучести. Формирование магистрального разрыва проявляется в неустойчивости процесса макроскопической деформации.

В морском ледяном покрове в результате воздействия ветра, течений, температуры воды и воздуха образуется широкий спектр физических процессов. Чувствительность ледяного покрова к различного рода динамическим явлениям взаимодействия атмосферы и океана может быть использован для изучения этого взаимодействия. Особенно это касается волновых и колебательных процессов в системе атмосфера—лед—океан—земная кора. Многообразие изменчивости физических процессов в такой системе можно разделить на следующие области временных масштабов:

— мелкомасштабные явления — процессы с периодами от долей секунды до нескольких минут;

— мезомасштабные явления — периоды от нескольких часов до нескольких суток;

— синоптическая изменчивость — длительность от нескольких суток до нескольких месяцев.

В море, покрытом льдом, спектр колебаний и волн расширяется за счет волн напряжений в ледяном слое. Таким образом, в ледяном покрове на воде присутствуют как упругие волны, так и морские гравитационные колебания и волны.

1.2. СЖАТИЯ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ МОРЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.2.1. Сжатия в дрейфующих льдах

Сжатия в дрейфующих льдах представляют собой довольно сложный физический процесс, проявляющийся при сплоченности 9—10 баллов во льдах различных форм — от гигантских ледяных полей до мелкобитого льда. При сжатиях формируются механические напряжения, зачастую существенно превышающие пределы прочности льда, что приводит к торошению. Причинами сжатий являются преимущественно ветер и течения, хотя в ряде случаев, например в припае, выявляются чисто термодинамические причины (термические сжатия). Сложность процесса сжатий состоит в том, что его характеристики существенно переменны как по акватории, так и во времени. Основным отличием сжатий от других видов деформаций ледяного покрова является то, что векторы действующих механических напряжений здесь являются преимущественно горизонтальными.

Принято считать, что в дрейфующих льдах сплоченностью 9—10 баллов направление вектора действия механических напряжений довольно близко направлению результирующего вектора ветра и течений. Возможное отклонение составляет не более 40° вправо от направления ветра. Однако это справедливо только для идеализированной интегральной картины, т.е. когда ледяной покров представляется в виде однородной плоской пластины на жидком основании.

В действительности векторное поле действующих механических напряжений чрезвычайно сильно дифференцировано из-за неоднородностей, которые обуславливают усиление локальных напряжений с соответствующими изменениями ориентации вектора (концентрация напряжений), либо, наоборот, способствуют сбросу напряжений аналогично с изменением ориентации вектора.

В качестве концентраторов напряжений выступают торосистые образования (отдельные зоны, а также барьеры и пояса торосов), магистральные трещины в ледяных полях, стыки ледяных полей, границы льдов различного типа (например, пресноводный и морской), различных возрастных категорий и т.д. Неоднородностями, обуславливающими сброс напряжений, являются полыньи и несмерзшиеся каналы во льду.

Проблема влияния концентраторов на характеристики векторного поля действующих механических напряжений в настоящее время практически не исследована. Основным препятствием для ее исследования, несомненно, является отсутствие надежной фактической информации. Учет концентраторов при разведке сжатий осуществляется преимущественно интуитивно, либо вообще не осуществляется.

Технические объекты, которые вносятся в структуру ледяного покрова — суда, буровые платформы и т.д. являются такими же неоднороднос-

тями, как и естественные и соответственно выступают как концентраторы напряжений. Их эксплуатация в условиях сжатий получается чрезвычайно затрудненной.

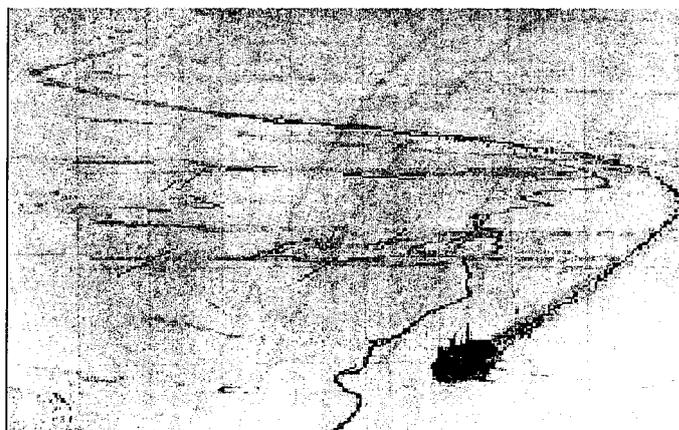


Рис. 5. Движение ледокола косыми галсами в условиях сжатий

Рассмотрим движение судов в сжатых льдах.

Известно [21, 52], что в напряженном (сжатом) состоянии дрейфующий ледяной покров характеризуется скрытой полигональной структурой, образуемой системой почти параллельных и взаимоортогональных ослаблений, вплоть до нарушений сплошности. При наличии информации о географическом расположении ослаблений в этой структуре судно может выбирать маршрут движения, максимально используя цепочки таких ослаблений (в идеальном случае — цепочки разводий). В существующей практике арктического мореплавания схема движения зачастую довольно близка к такому варианту, хотя она получается преимущественно за счет интуитивного выбора. При сжатиях движение осуществляется не по прямой, а косыми галсами по отношению к рекомендованному самолетной разведкой генеральному курсу (рис.5).

Такое маневрирование косыми галсами является результатом ряда причин. Во-первых, максимальное давление льда на корпус судна наблюдается при положении лагом к вектору действующих напряжений (оси сжатий) при этом диаметральной плоскости (ДП) параллельна фронту сжатий. Усиленное давление льда на корпус приводит к повышению энергозатрат на движение, либо к снижению скорости при фиксированных энергозатратах. Во-вторых, при проводке ледоколом транспортного судна (либо каравана судов) образуемый ледоколом канал довольно быстро сжимается, что препятствует движению транспортного судна, либо даже приводит к его заклиниванию. При заклинивании ледокол должен возвращаться и освобождать это судно. Затраты времени на освобождение

обычно не могут быть нормированы, особенно при отсутствии надежной информации о характеристиках поля сжатий в районе работ.

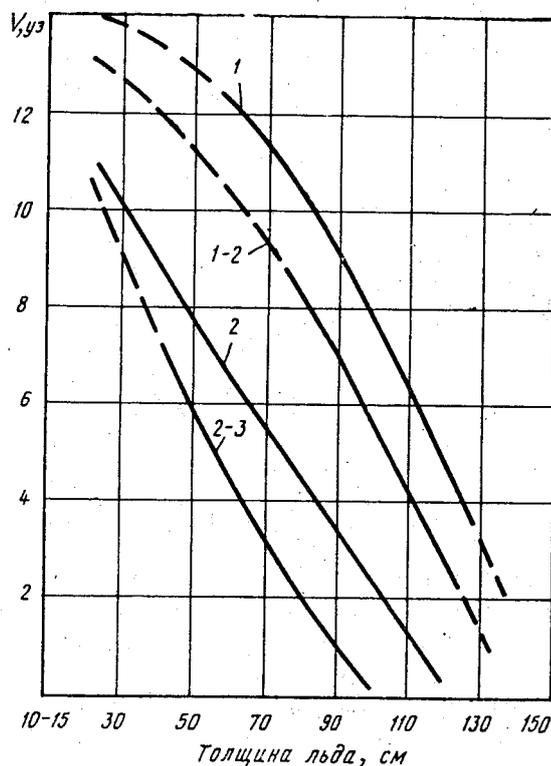


Рис. 6. Зависимость скорости проводки одного судна ледоколом типа “Арктика” от степени сжатия, баллы и толщины льда

На рис. 6. приведены зависимости скорости проводки одного транспортного судна ледоколом типа “Арктика” от толщины льдов и степени сжатия в баллах (по данным Н.Г.Бабича и А.Т.Казакова). Здесь наглядно видно, что сжатия до 2—3 баллов уменьшают среднюю скорость более чем в 3 раза, а во льдах толщиной свыше 100 см при сжатиях свыше 2 баллов проводка вообще становится проблематичной.

Зажимание канала за ледоколом при движении преимущественно по нормали к фронту сжатий может быть оценена по табл. 1. В льдах сплоченностью 9—10 баллов при отсутствии сжатий создаваемый ледоколом канал сохраняет свою ширину практически неизменной на расстоянии 5—7 миль и более за кормой ледокола. В условиях сжатий, как следует из табл. 1 ситуация резко изменяется. Даже при степени сжатий 0—1 балл уменьшение ширины канала на 20—30 % наблюдается на расстоянии 12—14 кабельтовых.

Уменьшение ширины канала даже на 20—30 % при проводке транспортных судов является весьма значимым фактором. Легко понять, на-

Таблица 1

Расстояния за кормой ледокола в кабельтовых для задаваемой степени уменьшения ширины канала при различных степенях сжатий

Степень сжатий, баллы	Степень уменьшения ширины канала, %		
	20–30 %	40–50 %	70–80 %
0–1	12–14	18–20	–
1	5–6	10–12	–
1–2	2–3	5–6	16–18
2	1,0–1,5	2,0–2,5	6–7
2–3	0,2–0,3	1,0–1,5	2–3
3	0	0,2–0,3	0,5–0,7

сколько это важно, если ширина транспортного судна близка ширине ледокола. В этом случае уменьшение ширины приводит к тому, что кромки канала просто зажимают транспортное судно. Но дело не только в этом. В канале за ледоколом остается довольно много мелких обломков льда, ведь только часть обломков заталкивается под кромки канала. В канале сохраняющейся ширины эти обломки почти не препятствуют движению, поскольку их сравнительно мало. Однако любое сужение канала однозначно приводит к повышению сплоченности обломков, что резко повышает трудности самостоятельного движения транспортного судна. При этом, особенно в условиях сильных сжатий, может возникнуть ситуация, когда эффективная толщина ледяного покрова в канале за счет разворотов обломков и их наслоения окажется превышающей толщину окружающих льдов.

В условиях сжатий наиболее выгодным является движение с курсовым углом, коллинеарным вектору напряжений (по оси сжатий). При этом



Рис. 7. Тактика пересечения зоны сжатий во льдах.

1 — ось сжатий; 2 — фронт сжатий

давление льда на корпус оказывается существенно ослабленным, а уменьшено зажимание канала. Также немаловажным фактором является то, что разлом льда при “набеге” ледокола при сжатиях обычно происходит преимущественно в направлении оси сжатий, что существенно облегчает движение и снижает энергозатраты.

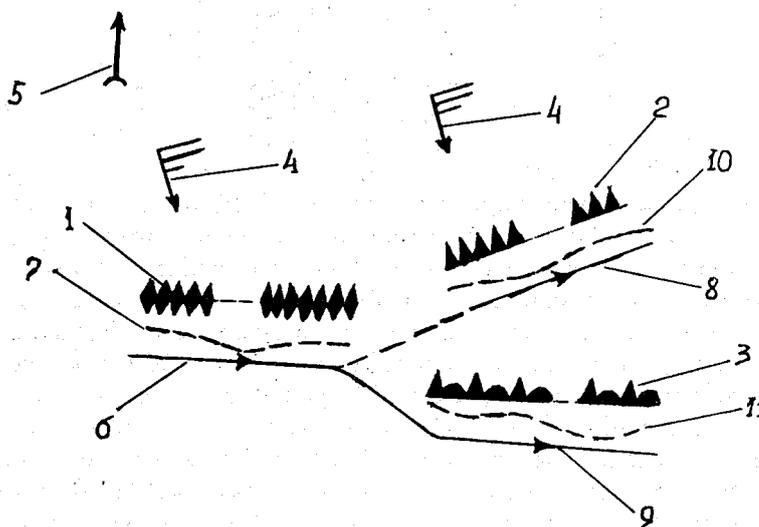


Рис. 8. Пример движения в условиях сжатий при наличии торосистых образований

Такое преодоление полей сжатого льда коллинеарно оси сжатий 1 проиллюстрировано на рис. 7. Фронт сжатий 2, показанный в виде двойной прерывистой линии, здесь совпадает со стыком ледяных полей и проявляется хорошо заметной зоной выторашивания льда и снега на этом стыке.

Поскольку рекомендованный генеральный курс обычно не учитывает реальное поле напряжений, то движение косыми галсами является определенным компромиссом между стремлением выдержать генеральный курс и необходимостью максимально облегчить движение в сжатом ледяном покрове. При этом отсутствие информации о реальной картине сжатий приводит к “слепому” поиску облегченных галсов, например, с использованием приема “подстройки” курсового угла под формирующиеся разломы в ледяном поле.

Особенно большие трудности возникают при выборе галсов в неоднородном ледяном покрове, в частности, вблизи торосистых образований (барьеров либо гряд торосов). Здесь общая картина поля напряжений существенно искажена за счет эффектов концентрации. В этих ситуациях выбор галсов обычно производят либо на основании общефизических представлений о закономерностях распределения поля напряжений в окрестностях кон-

центраторов при данных направлении и скорости ветра, либо путем оперативной авиасъемки сжатий (при наличии соответствующих возможностей).

В качестве примера выбора маршрута среди торосистых образований в условиях сжатий показана ситуация на рис. 8. Здесь обозначения пояса торосов 1, гряды 2 и барьера 3 соответствует стандартным. Направление ветра в районе показано вектором 4. Движение ледокола по рекомендациям работы [59] в этой ситуации задается с подветренной стороны торосистых образований на расстоянии не менее 10—15 м от их видимого края 5. Курс 6 — примерно соответствует направлению простираения пояса торосов 1. При существовании вариантов выбора курсов 7 и 8 предпочтение отдаются, естественно, тому, который ближе к генеральному курсу движения каравана

Интенсивность сжатий может очень быстро изменяться во времени. Установлено, что изменение степени сжатий на 1—2 балла иногда может происходить за промежутки времени единицы и десятки минут [25, 90]. Подобные изменения могут проявляться как бы в режиме пульсаций: после сильных подвижек и сжатий наступает кратковременное (до 0,5 ч) затишье, а затем сжатия вновь усиливаются.

При осуществлении ледовых проводок замечено, что при изменениях влияющих факторов (в основном ветра и течений) перестройка поля напряжений происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, т.е. оно обладает инерционностью.

В обобщенном виде проблема исследования характеристик инерционности поля напряжений сводится к выявлению вида и свойств некоторых передаточных функций $F(i\omega)$, связывающих изменчивость влияющих факторов и поля напряжений:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_8(\omega) &= F_1(i\omega)\bar{X}_B(\omega); \\ \bar{Y}_8(\omega) &= F_2(i\omega)\bar{X}_T(\omega),\end{aligned}$$

где $\bar{X}_B(\omega)$ — Фурье-преобразование изменчивости вектора ветра $\bar{V}_B(\tau)$; $\bar{X}_T(\omega)$ — аналогично — вектора течения $\bar{V}_T(\tau)$; $\bar{Y}_8(\omega)$ — аналогично — вектора механических напряжений $\bar{\delta}(\tau)$; ω — круговая частота.

Несомненно, что для столь сложных систем, как неоднородный ледяной покров, невозможно рассчитывать на линейность и низкий порядок (1-й либо 2-й) динамических свойств, т.е. названная проблема никак не может относиться к тривиальным. Дополнительно следует заметить, что даже в элементарном случае линейных динамических систем 2-го порядка свойства передаточной функции, как известно [79], могут приводить к формированию резонансных эффектов [20, 51, 66, 70, 108, 110]. Для более высоких порядков возможность резонансов усиливается, причем их характер становится полимодальным.

В ряде прямых наблюдений неоднократно отмечались сугубо локализованные взломы ледяного покрова при отсутствии концентраторов напря-

жений (однородный припай) в стороне от судна. Наиболее вероятной причиной подобных взломов (торошений) являются резонансные эффекты.

Кроме отмеченных особенностей важным является также то, что перестройка поля напряжений происходит не только при изменениях естественных влияющих факторов, но и при искусственном воздействии. В частности, таким воздействием, обуславливающим перестройку, является прокладка канала во льду. Ведь канал — это не что иное как вводимая в ледяной покров линейная зона сброса напряжений. При отмеченных свойствах передаточной функции реакция системы “ледяной покров” на подобное воздействие также может оказываться резонансной. Существование резонансных явлений выявлено, в частности, при распространении изгибно-гравитационных волн больших периодов [70, 82].

Изучение комплекса рассмотренных динамических проблем невозможно без накопления фактической информации о векторном поле механических напряжений.

Кроме ветра, течений и неоднородностей ледяного покрова, в комплексе влияющих факторов выделяются: температура воздуха и колебания уровня моря. Эти факторы преимущественно сказываются на характеристиках поля напряжений в больших ледяных полях. Физическая сущность взаимосвязей здесь очевидна, однако их изученность еще явно недостаточна, и здесь также требуется фактическая информация.

1.2.2. Сжатия в припайных льдах

В настоящее время понятие *сжатие* в классическом смысле относится только к дрейфующим льдам и к зоне кромки припая. Сжатия в припайных льдах на ледовых картах вообще не оцениваются. При выполнении ледовой авиаразведки над припаем невозможно выделить традиционные дешифровочные признаки действия механических напряжений. Исключение составляет лишь предельный случай сжатий — взлом участка ледяного покрова (торошение).

Между тем оценка сжатий в припае, а в более широком плане — деформационных процессов в припае, в настоящее время не менее важна, чем в дрейфующих льдах. Это связано, во-первых, с возрастанием объема ледокольных проводок в припайных льдах, а во-вторых — с осуществлением операций выгрузки транспортных судов через припай на необорудованный берег [2, 7, 8, 58], где только специальная подготовка зон выгрузки с учетом характера распределения напряжений может обеспечить полную безаварийность работ.

Сжатия в припайных льдах формируются за счет следующих основных факторов. Во-первых, это воздействие сжатых дрейфующих льдов на внешнюю кромку припая. Во-вторых, прямое воздействие ветра и течений на пластину припая. В-третьих, термодинамические процессы в ограниченных берегами акваториях (термические сжатия). В-четвертых, колебания уровня воды в таких же ограниченных берегами акваториях.

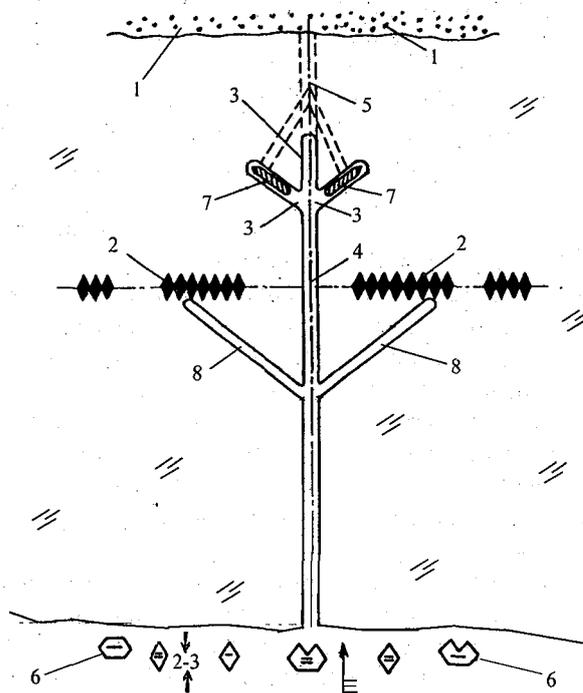


Рис. 9. Схема выгрузки транспортных судов через припай

Воздействие дрейфующих льдов, прижимаемых ветром и течениями к внешней кромке припая, создает типичную картину концентрации напряжений у кромки и спад этих напряжений с уходом в глубь припая в целом обратно пропорционально расстоянию от кромки. Однако эта картина слишком идеализирована, поскольку припай практически никогда не бывает однородным и определенная свобода в распределении концентраторов: торосов, трещин, границ льдов различной толщины и т. д. создает распределение напряжений, весьма далекое от вышеописанного.

В качестве примера влияния сжатий в припае, вызванных воздействием дрейфующих льдов на внешнюю кромку, можно рассмотреть их влияние на операции выгрузки транспортных судов у ледовых причалов [2, 7, 43, 58]. Подобная выгрузка судов на припай производится в условиях необорудованного причалами берега. В этой ситуации в зоне устойчивого припая преимущественно между берегом 1 (рис. 9) и основным барьером торосов 2 создаются вырезы 3 во льду для стоянки в них транспортных судов, вводимых, например, с помощью ледокола, через основной канал 4. От вырезов 3, которые и являются ледовыми причалами, к берегу прокладывается автомагистраль 5, по которой выгружаемые грузы перевозят автотранспортом на берег.

При воздействии дрейфующего льда 5 на внешнюю кромку припая транспортных суда 7, стоящие под выгрузкой в вырезах ледовых причалов 3, зажимаются кромками вырезов. При этом формируется опрокидывающий момент и, если не принимать специальных мер, то создается аварийная ситуация, которая в простейших случаях ведет к разрушению грузовых площадок и соответственно к потере автотранспорта и грузов на этих площадках.

Для защиты от действия сжатий во льду могут создаваться дополнительные каналы 8 по обе стороны от основного канала 4. Функция этих каналов 8 — обеспечивать сброс формирующихся в припае напряжений, т.е. служить некоторым демпфером для защищаемой зоны, включающей вырезы 3 и грузовые площадки. Для повышения эффективности защиты оконечности этих дополнительных каналов упираются в основной барьер торосов 2.

Прямое воздействие ветра и течений на пластину припая для реальных ситуаций довольно мало исследовано. Идеализированная картина здесь тоже не является особенно сложной, однако, как и в предыдущем случае, наличие концентраторов и сложная конфигурация береговой черты сильно усложняют картину.

Изменчивость температуры воздуха приводит к вариациям профиля температуры во льду, при этом нижнее значение на профиле остается практически постоянным (граница лед—вода), а верхнее — с некоторым запаздыванием отслеживает изменения температуры воздуха. В результате в пластине льда формируются *термические сжатия*, по своему характеру значительно отличающиеся от типично *динамических сжатий*, т.е. вызванных действием ветра и течений. Одним из тривиальных результатов термических сжатий являются *сухие* (несквозные) трещины, усиливающие неоднородность ледяного покрова и соответственно усложняющие картину поля напряжений. Термические сжатия особенно характерны для полузакрытых акваторий.

Влияние колебаний уровня на напряженно-деформированное состояние припая считается широко известным. При простейшем рассмотрении припая как скрепленной с берегом однородной ледяной пластины на жидком основании колебания уровня приводят к возникновению преимущественно изгибных колебаний (деформаций) льда. С таким видом деформаций в основном связаны *приливные трещины*, формирующиеся на границе между собственно припаем и *подошвой припая*. Однако в условиях сложной конфигурации береговой черты такая однозначная взаимосвязь нарушается и изгибные деформации часто трансформируются в продольные, приводя к формированию типичных сжатий. Таким образом, из сделанного краткого описания ледовых сжатий в дрейфующих льдах и припая следует:

— сжатия являются весьма сложным физическим процессом формирования в ледяном покрове поля действующих в горизонтальном направлении механических напряжений, вызывающих собственно *деформации сжатия* (в отличие от деформаций изгиба, среза и т.д.);

— для описания сжатий как физического процесса необходима, в первую очередь, фактическая информация о поле действующих напряжений; кроме этого необходимы данные о распределении неоднородностей в ледяном покрове, выступающих в роли концентраторов напряжений;

— сжатия характерны не только для дрейфующих льдов, где они традиционно определяются и учитываются, но также и для припая; причем, если для дрейфующих льдов преимущественными причинами сжатий являются *ветер и течения*, то для припая не менее важны *температура и колебания уровня*;

— формирующееся при сжатиях поле механических напряжений не является статичным, а существенно изменчиво во времени, что требует при реализации наблюдений таких же подходов, как и при других видах гидрофизических измерений.

1.3. ПОДВИЖКИ МОРСКИХ ЛЬДОВ

1.3.1. Подвижки в дрейфующих льдах

При описании динамических процессов во льдах принято принимать во внимание следующие природные силы, действующие на ледяной покров и вызывающие его дрейф, подвижки, сжатия и торошение :

— касательное напряжение трения со стороны воздуха на поверхности раздела воздух—лед (τ_a);

— касательное напряжение трения со стороны воды на поверхности раздела лед—вода (τ_w);

— горизонтальная составляющая отклоняющей силы вращения Земли (C);

— проекция силы тяжести на поверхность моря (G);

— горизонтальная составляющая приливообразующей силы (T_s);

— сила внутреннего взаимодействия между ледяными полями (R).

По характеру действия на лед силы τ_a , τ_w и R относятся к поверхностным, а C , G и T_s — к массовым. Силы τ_a , G , T_s являются активными, так как их действие вызывает дрейф; остальные перечисленные силы — пассивные. Результирующая величина всех сил равна произведению ускорения на массу льда, приходящуюся на единицу площади

$$\tau_a + \tau_w + C + G + T_s + R = \rho_l h_l \frac{dV}{dt},$$

где ρ_l — плотность льда; h_l — толщина льда; V — вектор скорости дрейфа.

Сила касательного давления ветра на лед выражается формулой

$$\tau_a = \rho_a k_z \left. \frac{dW}{dz} \right|_{z=0},$$

где ρ_a — плотность воздуха; k_z — коэффициент вертикального турбулентного обмена в воздухе; W — скорость ветра.

Сила трения на нижней поверхности льда может быть выражена аналогичной формулой. Учет стратификации воды осуществляется по градиенту плотности воды и скорости дрейфа. Однако вертикальный градиент плотности в верхнем подледном слое вследствие распределения вод летом под влиянием таяния и осолонения зимой при ледообразовании испытывает заметные сезонные изменения. В связи с этим соответственно изменяется и средняя сила касательного трения на нижней поверхности ледяного покрова.

Отклоняющая сила вращения Земли может быть выражена по формуле

$$C = \rho_i h_i f V,$$

где $f = 2\omega \sin\varphi$ — параметр Кориолиса; $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ — угловая скорость вращения Земли; φ — географическая широта; V — скорость дрейфа льда.

В северном полушарии отклоняющая сила направлена под углом 90° вправо от вектора скорости дрейфа. В условиях Арктического бассейна параметр Кориолиса очень мало зависит от широты. Составляющая силы тяжести, касательная к водной поверхности, возникает из-за того, что поверхность океана обычно не является горизонтальной. Величина силы, действующей на единичный столб находящегося на плаву ледяного покрова, определяется по формуле

$$G_n = -\rho_i g h_i \frac{d\xi}{dn},$$

где ξ — отклонение уровня моря от невозмущенного положения; n — перпендикуляр к изогипсе (линии равных высот уровня).

Наклон уровня вызывается неравномерностью распределения атмосферного давления, прохождением поверхностных волн разной природы, сгонно-нагонными явлениями, неравномерностью плотности воды и т.д. Сила G_n вносит заметное возмущение в движение льда, обусловленное прохождением длинных волн, в том числе и приливо-отливных [39]. Приливо-образующие силы T , возникают из-за взаимосвязанного движения Земли, Луны, Солнца и др. планет (наиболее значительная приливо-образующая сила Луны).

Процессы взаимодействия зависят от целого ряда условий, среди которых наиболее важными являются сплоченность ледяного покрова, равномерность полей внешних сил, главным образом, сил касательного напряжения ветра, а также характер береговой черты и рельеф дна.

Наиболее отчетливо силы внутреннего взаимодействия обнаруживаются в неоднократно отмечаемых фактах опережения изменения дрейфа относительно соответствующих изменений ветра, а также в том, что заметное влияние берегов на дрейф льда распространяется на сотни километров (более 500 км). Наиболее важной особенностью проявления сил внутреннего взаимодействия в ледяном покрове является существенная разница в характере взаимодействия при трении кромками, при давлении льдин друг на друга и при соударении. В первом случае во взаимодействии участвуют касательные силы, а во втором случае — силы нормальные.

К внутренним силам относятся также касательные усилия, связанные с рассеянием энергии в процессе выравнивания скоростей по типу сухого или вязкого трения.

Можно выделить *мелко-, средне- и крупномасштабные* ледовые явления. В *крупномасштабных* проявлениях деформации льдов с характерными размерами порядка сотен километров ледяной покров практически является дискретной средой, реагирующей на внешние силы (касательные напряжения со стороны ветра и воды, градиенты давлений и уровней и т.д.). Внутренние напряжения, возникающие в ледяном покрове такого масштаба, интегрально уравниваются, их уровень значительно ниже, чем у мелкомасштабных деформаций.

Упорядоченная структура крупномасштабных ледяных образований является следствием силового взаимодействия льдов и соотношения нормальных и касательных усилий в ледяном покрове.

Среднемасштабные деформации в ледяном покрове возникают как следствие неоднородностей действия сил и внутренних напряжений. Их масштабы могут составлять единицы метров — десятки километров.

В работе [53] в среднемасштабных деформациях ледяного покрова выделяются два основных типа движений:

- поступательные движения;
- вращательные движения.

Физический смысл различий между этими движениями ясен из использованных терминов. Совокупность этих двух типов движений названа в работе [53] *подвижками дрейфующих льдов*. Термин — *подвижки* — представляется наиболее приемлемым для описания методов измерений.

Для крупномасштабных и среднемасштабных деформаций ледяного покрова нехарактерны процессы разрушения льда как материала. Эти процессы проявляются в области малых масштабов деформаций. Тем не менее при описании деформаций крупного и среднего масштабов эти процессы целесообразно учитывать.

При деформациях ледяного покрова выделяют следующие виды разрушения ледяных полей:

- раздробление кромок льдин;
- разрушение изгибом силой, направленной поперек льдины (при наползании льдин, при изгибе зыбью и др.);
- разрушение изгибом при горизонтальных силах сжатия (продольный изгиб).

Усилие сжатия можно оценить из условия устойчивости ледяного покрова. Для полубесконечной тонкой упругой пластины на упругом основании гидравлического типа потеря устойчивости формы будет при критическом усилии, определяемом из теории устойчивости равновесия упругих систем. Критическое усилие для бесконечной пластины будет в 2 раза больше.

При *мелко- или микромасштабных* деформациях отдельных ледяных полей, обусловленных внутренними силами, местные напряжения могут

соответствовать области упругих деформаций, и могут достигать разрушающих значений. Внутренние силы включают сдвиговые и нормальные напряжения в ледяном покрове (им соответствуют деформации сдвига и деформации сжатия — разрежения).

При постановке задач измерений подвижек дрейфующих льдов (среднемасштабных деформаций ледяного покрова) целесообразно учитывать рассмотренные выше особенности воздействия гидрометеорологических факторов на лед и взаимодействия льдин между собой.

1.3.2. Подвижки припайного льда

Подвижки припайного льда представляют собой перемещения отдельных его участков как относительно координат начального положения, так и относительно друг друга. Эти перемещения могут достигать единиц, а в некоторых случаях — десятков метров. Перемещения могут происходить как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Перемещения по вертикали преимущественно обуславливаются колебаниями уровня воды. Перемещения по горизонтали связаны с действием сил ветра и течений, а также с термическими факторами.

Отмеченные довольно большие значения возможных перемещений фиксированной точки припайного льда (единицы метров) выявлены экспериментально. Прежде всего, следует отметить работы Р.М.Скокова (например [68]), где горизонтальные подвижки в несколько метров наблюдались для припая на шельфе о-ва Сахалин.

Действие сил ветра и течений на подвижки припая является чрезвычайно малоизученным. Несколько большее внимание в литературе уделяется термическим факторам подвижек, особенно в связи с возникающими при таких подвижках *термическими сжатиями* в припае. Действительно, коэффициент линейного расширения льда от температуры для диапазона температур $0 \div -30^\circ\text{C}$ соответствует $40 \div 60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При изменении температуры, например, на 20°C линейные деформации припая могут достигать 10^{-3} , что при ширине припая в 1 км приводит к перемещениям порядка 1 м. Естественно, эти оценки весьма приближенные. Здесь не учтены ни реальные модули упругости льда как материала, ни роль трещин и других неоднородностей во льду.

Реальные неоднородности покрова припая обуславливают неравномерность распределения подвижек по акватории и, в частности, приводят к термическим сжатиям и локальному взлому льда с формированием торсистых зон. Все эти явления весьма мало изучены.

Насущная необходимость прямых измерений вертикальных и горизонтальных подвижек припайного льда особенно проявилась в связи с интенсивным развитием инженерно-технических работ на шельфе замерзающих морей, в частности, связанных с нефтегазразведкой. Наличие фактической информации о подвижках позволяет обеспечивать безаварийность работ буровых установок, а предварительное изучение закономерностей подвижек — обосновано выбирать точки размещения этих установок.

ГЛАВА 2. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВЫХ СЖАТИЙ

2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЖАТИЙ ПО ХАРАКТЕРНЫМ ПРИЗНАКАМ СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Характеристики динамики ледяного покрова, в том числе сжатия, определяют дистанционно преимущественно с авиасредств ледовой разведки и с искусственных спутников Земли (ИСЗ). В настоящее время ледовая разведка функционирует как система *многоуровневого* сбора информации.

Верхний уровень представляет собой спутниковую мелкомасштабную съемку и обеспечивает, кроме чисто научных задач, также решение задач стратегии выбора трасс морских операций в Арктике и других замерзающих регионах. В частности, при планировании проводок в западном секторе Арктики может производиться выбор между прибрежным вариантом плаваний, либо — через мыс Желания, и т.д.

Следующий уровень — визуальные, либо инструментальные в совокупности с визуальными, самолетные съемки, которые позволяют планировать генеральный курс каждого конкретного судна либо каравана судов.

Третий уровень — это вертолетная, преимущественно визуальная, разведка, дополняемая (при наличии возможностей — в настоящее время сравнительно редких) инструментальными измерениями отдельных характеристик ледяного покрова, например толщины льда. Вертолетная разведка позволяет контролировать реальную ледовую обстановку в окрестностях судна и решать задачи тактики плавания. При этом существенным дополнением к данным вертолетной разведки является контроль ледовой обстановки с помощью судовых радиолокационных станций (РЛС) и визуальные наблюдения с судов.

Каждая из выполняемых съемок в этой последовательности является развитием и уточнением предыдущей как по пространству, так и во времени. Развитие и уточнение по пространству состоит в изменении масштабов разведываемых районов с соответствующим повышением детализации данных, а во времени — в сокращении сроков между съемками. Последнее утверждение, как это ни странно, относится также и к спутниковой съемке за исключением ИСЗ, снабженных специальной радиолокационной техникой. Действительно, традиционные виды информации, получаемые с ИСЗ, — это оптические и инфракрасные изображения поверхности. Но для того, чтобы эти изображения можно было интерпретировать в ха-

раактеристиках состояния ледяного покрова, необходимо, чтобы они были получены в отсутствие облачности, даже просвечивающей. А ясное небо в арктических регионах — не такое уж частое событие. По оценкам, сделанным в работе [63], достаточно качественную информацию о ледяном покрове в Арктике можно получать в среднем 1 раз в 3—5 суток, а в антарктических морях — 1 раз в 8—10 суток.

Такая организация сбора ледовой информации позволяет связывать ее с существующей системой прогнозов — от долгосрочных до суточных и даже до часовых. Соответственно все это несложно связать с иерархией потребителей информации — организаторов и исполнителей морских операций во льдах.

Рассмотренная схема, несомненно, идеализирована. На практике описанные взаимосвязи зачастую нарушаются и в ряде случаев возникает дублирование задач, при этом из-за неналаженной ритмичности поступления информации может возникать ее избыточность в одних ситуациях и недостаточность — в других. Не является полезным ни то и ни другое. Учитывая чрезвычайно высокую стоимость ледовой информации, следует стремиться к тому, чтобы осуществлялся сбор только нужной информации, при этом избыточность явно противопоказана. Все это требует тщательной методологической проработки вопросов организации всей структуры сбора.

В рамках рассмотренной структуры узкая задача определения сжатий во льдах, как показано в предыдущем разделе, одной из важнейших с точки зрения судоводителей характеристик динамики ледяного покрова, может решаться только на двух нижних уровнях, т.е. при самолетной и вертолетной разведках. Дело в том, что индикатором сжатий являются очень локальные особенности состояния ледяного покрова и с ИСЗ они практически неразличимы.

В соответствии с существующими рекомендациями [23, 40] интенсивность сжатий оценивается по 4-балльной шкале (табл.2.). Эта шкала применяется для дрейфующих льдов сплоченностью 9—10 баллов.

Как следует из приведенных характеристик, определение балла сжатия производится при наблюдениях в течение некоторых (обычно не указываемых в инструкциях) промежутков времени, т.е. *в динамике*. Шкала приспособлена преимущественно для наблюдений с судна — здесь подобные наблюдения *в динамике* вполне реальны. Значительно труднее использовать шкалу при наблюдениях с авиасредств ледовой разведки.

При визуальном определении сжатий с авиасредств используется практически единственный дешифровочный признак — свежее выторашивание снега и измельченного льда на стыках ледяных полей сплоченностью 9—10 баллов. Другие приемы (учет ветра, дрейфа ледяных полей, системы течений в районе и т.д.) являются скорее физически-интуитивными, чем практическими. Эффективность этих приемов тесно связана с опытом и квалификацией разведчика. При наличии низкой облачности либо тумана

Таблица 2

Шкала интенсивности сжатий

Балл	Характеристика
0	Лед на “распльве” — лед сплоченностью 9—10 баллов, пришедший в заметное движение при начавшемся разрежении
1	Слабое сжатие. В зоне сжатия наблюдаются небольшие участки чистой воды; образуются отдельные торосы взлома, а в молодом льду — наслоения. Тертый лед в результате общего уплотнения выжимается кверху, на края льдин
2	Значительное сжатие. В зоне сжатия участки чистой воды закрываются. Торосы взламываются. В результате интенсивного торошения молодых льдов частично захватываются и однолетние льды, появляются свежие торосы в виде гряд и наслоений. Тертый лед набивается в плотный слой и вспучивается, образуя валы (подушки)
3	Сильное сплошное сжатие. Происходит интенсивное торошение однолетних льдов, частично захватывающее двухлетние и многолетние льды. Всюду наблюдаются валы тертого льда и гряды торосов. Молодой лед преимущественно всторошен

та, а также в условиях полярной ночи визуальная разведка сжатий становится вообще невозможной.

Несомненно, что 4-балльная шкала с метрологических позиций практически не может оцениваться. При лобовой оценке погрешности ± 1 балл хотя это все же в большей степени *разрешающая способность*, а не погрешность в общепринятом смысле), определения по этой шкале получаются весьма некорректными. Но, конечно, лобовую оценку применять вряд ли уместно. Нормальные метрологические исследования методики не проводились.

Кроме определений по приведенной шкале, предпринимались попытки и ввести при наблюдениях с судов более корректные методы. В частности, несомненный интерес представляет метод определения интенсивности сжатий по степени закрытия канала за движущимся ледоколом (см. табл. 1). Здесь применяются числовые критерии оценки сжатий, что снижает погрешность, а также появляются возможности инструментальных определений, в частности, с помощью простейших геодезических либо гидрометеорологических приборов, например, волномера-перспектометра типа ГМ-12. Однако методическая проработанность этого метода остается еще очень низкой.

Все вышесказанное относилось только к дрейфующим льдам. Как уже отмечалось ранее, само понятие *сжатий* сформировалось применительно именно к этому виду ледяного покрова, соответственно этому разработались и методики. Применительно к сжатиям в припайных льдах какие-либо конкретные методики сравнительно простых (визуальных) определений их интенсивности вообще отсутствуют. По-видимому, лишь после-

дня из рассмотренных методик может применяться независимо от вида ледяного покрова, но она, как отмечалось, еще мало отработана.

2.2. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СЖАТИЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА СОБСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ЛЬДА

2.2.1. Физические основы возбуждения собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) при деформационных процессах в ледяном покрове

Характер деформаций при механических напряжениях, близких к пределу длительной ползучести. При действии механических напряжений, близких к пределу длительной ползучести льда σ_{∞} выделяются три основных фактора [15, 42, 66, 87]: упругие и пластические деформации отдельных кристаллов; взаимное перемещение кристаллов; разрушение кристаллов. При этом в реальных условиях неоднократного напряженного состояния происходят два взаимно противоположных процесса: процесс локальных разрушений (накопление дефектов структуры) и процесс рекристаллизации (восстановление структуры, "залечивание" дефектов). При постоянной температуре соотношение между интенсивностями этих процессов пропорционально действующему механическому напряжению. Такой характер деформаций принято называть ползучестью, а напряжение, при котором происходит переход от затухающей или установившейся ползучести (интенсивности накопления дефектов меньше или равна интенсивности "залечивания") к ползучести с возрастающей скоростью (интенсивность накопления больше интенсивности "залечивания") — пределом длительной ползучести σ_{∞} .

Вопросы ползучести теоретически и экспериментально исследовались в работе [42]. Установлено, что с ползучестью связано образование во льду внутрискристаллических и транскристаллических микротрещин (МТ), причем это образование сопровождается появлением импульсов акустического излучения (эмиссии). Полная длительность излучаемого импульса по экспериментальным данным достигает 2—10 мс, а в развертке фиксируются колебания с периодом 50—70 мкс с наложением на них более высокочастотных колебаний. Физический механизм возбуждения автоколебаний в работе [42] не рассматривается. Однако наиболее вероятно, что он обусловлен упругими свойствами образовавшейся микротрещины и носит резонансный характер.

Полученное в работе [42] эмпирическое выражение для количества микротрещин (в 1 см³), образующихся в режиме ползучести при $\sigma > \sigma_{\infty}$ регистрируемых в виде импульсов акустической эмиссии, выглядит следующим образом:

$$N - N_0 = N_0 \left\{ \exp \left[\bar{X}(T) \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} - 1 \right) \sqrt[3]{\tau} \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

где N_0 — начальное (зародышевое) количество микротрещин, присущее данному льду при данной температуре до приложения к нему нагрузки $\ln N_0 = 27,765 - \frac{8769}{T}$, см⁻³; $\bar{X}(T) = 0,273 + 0,017(T - 260)$ — эмпирический параметр, с^{1/3}; σ — действующее механическое напряжение, Па; τ — время, с; T — абсолютная температура, К.

Результаты расчетов по приведенному выражению достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Как показывают лабораторные данные, одновременно с акустическим импульсом при образовании микротрещин возбуждается также электромагнитный импульс. Синхронная регистрация акустических импульсов и импульсов электромагнитного излучения ЭМИ производилась также в работах [26, 37, 45, 111]. Аналогичные эффекты зарегистрированы при нагружении других диэлектриков — горных пород, стекла, керамики и т.д. [27, 44, 61], а также при кристаллизации воды [48, 107].

Для возбуждения электромагнитных импульсов при микротрещинообразовании, очевидно, в первую очередь, необходимо, чтобы борта микротрещины при ее формировании оказались заряженными разноименными электрическими зарядами. При этом дальнейший процесс возбуждения ЭМИ, как будет рассмотрено в дальнейшем, может происходить различными путями как за счет релаксации этих зарядов, так и в результате их неравномерного движения при скачкообразном прорастании трещины, а также при колебаниях заряженных бортов (параметрическое возбуждение).

Механизм заряджения бортов МТ при ее формировании. Электризация вновь образующихся поверхностей для многих диэлектриков известна [27], а механизм заряджения является трибоэлектрическим. Заряджение формируется двумя основными путями:

— случайным разрывом межатомных и межмолекулярных связей, приводящим к возникновению на каждой из поверхностей зарядовой мозаики, т.е. локальных избыточных флуктуационных зарядов;

— движением к поверхности или вновь возникающими на ней дефектами и дислокациями [61].

Заряджение при случайном разрыве связей обычно является менее значимым. С учетом этого, а также поскольку условия для второго вида заряджения не всегда выполняются, в дальнейшем будем рассматривать только первый вид заряджения, считая, что второй лишь усиливает результирующие эффекты возбуждения ЭМИ.

В течение промежутков времени, намного меньших времени релаксации в данном диэлектрике, поверхностную плотность q_s зарядовой мозаики на вновь образующейся поверхности можно оценить с использованием распределения Больцмана

$$q_s \cong en_{s0} \exp \frac{U_0 - U_c}{kT}, \quad (2)$$

где n_{30} — плотность поверхностного одноатомного слоя; U_0 — энергия связи нейтральных атомов (теплота сублимации); U_c — энергия связи ионов; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд.

Несомненно, что числовые оценки по выражению (2) могут лишь дать нижнюю границу поверхностной плотности зарядов. В соответствии с теорией кристаллической решетки Борна [61, 66]: $U_c \approx 1,1U_0$, а $U_0 \approx 100$ ккал/моль. При $T=270$ К и $n_{30} = 13,3 \cdot 10^{18}$ м⁻², характерном для кристаллической структуры натуральных льдов, получим $q_s \approx 2,8 \cdot 10^{-8}$ Кл/м². Учитывая слишком приближенный характер оценки q_s , в дальнейшем будем ориентироваться на диапазон значений $10^{-8} \div 10^{-7}$ Кл/м².

Излучение за счет неравномерного движения разделенных зарядов. Поскольку рост и раскрытие МТ происходит неравномерно, скачками, то при этом должно формироваться переменное электромагнитное поле (ЭМП) за счет наличия ускорений у зарядов и результирующих изменений дипольного момента. Применительно к ионным диэлектрикам такой механизм рассматривается в работе [61]. Уравнение движения единичного заряда представляется в виде

$$X(y, \tau) = (l - y) \operatorname{tg} \alpha \sin(\omega \tau + \frac{\omega y}{V_{MT}} \cos \alpha), \quad (3)$$

где y — координата в направлении раздвижения МТ; l — длина элементарного скачка; α — угол раскрытия участка с зарядом; V_{MT} — скорость раздвижения МТ; $\omega = 2\pi/\tau_p$ — круговая частота; $\tau_p/2$ — длительность раскрытия участка; τ — время.

Дипольный момент участка трещины с зарядом Q_i с учетом интерференции излучателей имеет вид

$$P(\tau) = \frac{Q_i}{l} \int_0^l X(y, \tau) dy. \quad (4)$$

С учетом выражений (3) и (4) получается выражение для оценки средней мощности дипольного излучения

$$\bar{N}_g = \frac{\omega}{3\pi c^3} \int_0^{0,5\tau_p} \left(\frac{d^2 P(\tau)}{d\tau^2} \right)^2 d\tau \approx 4 \cdot 10^3 \frac{Q_i^2 \omega^4 l^2 \operatorname{tg} \alpha}{\pi^4 c^3}. \quad (5)$$

При площади МТ $S = 100$ мкм², длине $l = 10^{-5}$ м, скорости $V_{MT} = 10^3 \div 10^4$ м/с и $C = 3 \cdot 10^8$ м/с числовые оценки по выражению (4.5), сделанные в работе [61], дают максимальное значение мощности порядка $4 \cdot 10^{-22}$ Вт при эффективной температуре в полости разрыва $T_{эф} \approx 900$ К. Наиболее вероятный диапазон частот излучения составляет $1 \div 10^3$ МГц.

Следует отметить немаловажный факт, что эти оценки сделаны именно для излучения, т.е. для так называемой волновой зоны МТ как диполь-

ного излучателя. Тем самым оценки не учитывают индукционную и электростатическую составляющие. В ближней зоне МТ полная мощность на 5—6 порядков больше, однако даже в таком случае ее величина слишком мала по сравнению с экспериментально наблюдаемыми значениями. Поэтому рассмотренный механизм, по-видимому, играет второстепенную роль.

Параметрическое возбуждение переменного ЭМП. Рассматривая центральный участок МТ как плоскопараллельный конденсатор с зарядами $+Q$ и $-Q$ на бортах, получим полную энергию

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{q_s^2 S_{\text{н}} r}{2\epsilon_0 \epsilon_r}, \quad (6)$$

где $S_{\text{н}}$ — площадь колеблющегося участка МТ; C — емкость конденсатора; q_s — поверхностная плотность зарядов на бортах МТ; r — расстояние между бортами на участке $S_{\text{н}}$; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_r — диэлектрическая проницаемость внутри МТ.

Оценим энергию переменной части электрического поля МТ при колебаниях бортов с амплитудой Δr

$$W_{\sim} = dW = \frac{q_s^2 S_{\text{н}}}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \Delta r. \quad (7)$$

При $S_{\text{н}} = 0,5 \text{ мм}^2$ и $\Delta r = 0,01 \text{ мм}$ получим $W_{\sim} \approx 3 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$. Учитывая, что при таком механизме происходит возбуждение переменного ЭМП с теми же периодами, что и механические колебания МТ как резонатора, выделяющаяся мощность составит порядка 10^{-10} Вт .

Однако возникающее при параметрическом возбуждении переменное ЭМП имеет наиболее значимую электростатическую составляющую, которая затухает в однородной среде обратно пропорционально кубу расстояния. Токовые же процессы, формирующие переменное магнитное поле, менее значимы. Действительно, индуцированное магнитное поле здесь будет определяться известным уравнением

$$\text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d\mathbf{E}}{dt},$$

где γ — проводимость среды внутри МТ; \mathbf{E} — напряженность электрического поля, определяемая путем решения уравнения Лапласа. Ее модуль получается

$$E = -\text{grad } \varphi = \frac{\sigma_s}{\epsilon_0 \epsilon_r}.$$

В силу слишком незначительной проводимости γ токами проводимости можно пренебречь, соответственно, теряется значение полной напряженности поля \mathbf{E} и в формировании \mathbf{H} участвует лишь ее переменная

составляющая, которая обуславливает ток смещения и существенно меньше полной напряженности.

Из-за рассмотренных причин параметрический механизм возбуждения ЭМИ, по-видимому, как и предыдущий, можно считать второстепенным.

Возможность существования разрядной релаксации разделенных зарядов при деформациях льда. При визуальных наблюдениях за торошением льда неоднократно отмечалось наличие свечения [15], которое в более поздних работах получило название триболоминисценции. Механизм возникновения триболоминисценции практически не исследовался, однако в литературе отмечается его наиболее вероятная связь с электрическими процессами при разломах льда. Зарегистрировано также явление триболоминисценции при кристаллизации воды в ограниченных объемах [83].

В работах [77, 80], где рассматривались результаты натуральных экспериментов по выявлению ЭМИ при деформационных процессах в морских льдах, было выдвинуто предположение, что для электрических зарядов, разделяющихся по бортам свежееобразующихся микротрещин в деформирующемся льду, в полостях этих трещин существуют условия для возникновения электрического пробоя и релаксации зарядов в искровом канале. При этом каждый из разрядов сопровождается электромагнитным излучением. Естественно, что в спектре этого излучения может присутствовать, как и при любых искровых разрядах, также и излучение в оптическом диапазоне длин волн.

Одним из условий возникновения электрического пробоя внутри МТ является наличие газового заполнения полости. Механизм такого заполнения представляется следующим.

Рассмотрим образование внутрикристаллической МТ с учетом особенностей структуры льда. Как известно, природный лед имеет преимущественно гексагональную структуру, при этом каждый атом кислорода находится в центре тетраэдра, образуемого четырьмя другими атомами кислорода, отстоящими друг от друга на расстоянии $2,76 \text{ \AA}$. Каждая молекула воды соединена водородными связями с четырьмя ее ближайшими соседями. Такая "упаковка" молекул приводит к открытой кристаллической решетке, состоящей из слоев, перпендикулярных к оптической оси, которую принято называть осью C , и содержащих гексагональные кольца из молекул воды (рис. 10). Между слоями содержатся водородные связи, линии которых параллельны C -оси. Плоскости, пересекающие эти водородные связи, т.е. перпендикулярные C -оси, являются базисными плоскостями. Более подробно с кристаллической структурой льда можно ознакомиться в обобщающих работах, например [15].

При механическом нагружении кристалла льда его деформация в направлении базисной плоскости происходит значительно легче, чем в направлении C -оси, т.е. разрушение водородных связей между гексагональными кольцами осуществляется с намного меньшими энергетическими

затратами, чем разрушение связей внутри кольца. Из-за этого получается, что ориентация образующихся при ползучести микротрещин преимущественно связана с ориентацией базисных плоскостей.

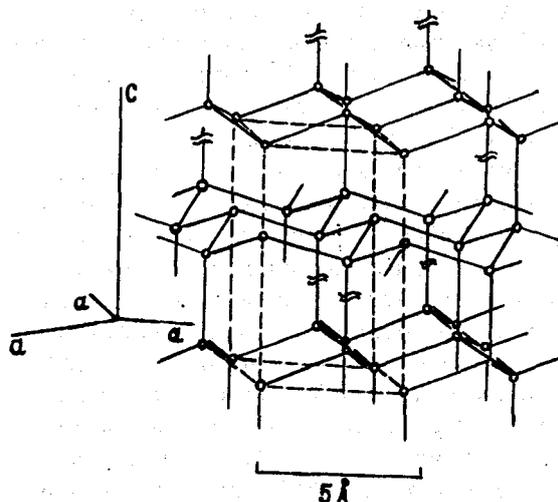


Рис. 10. Структура кристаллической решетки льда с указанием расположения атомов кислорода: пунктир — единичная ячейка; извилистые линии — субмикроразрывы водородных связей; C — оптическая ось кристалла.

Однако маловероятно, чтобы разрывы связей и образование соответствующих дислокаций происходили только по одной и той же базисной плоскости, расположенной между двумя соседними слоями колец. Подобные разрывы (их уместно назвать субмикроразрывами решетки) должны захватывать некоторую область кристалла, которая по каким-либо причинам, например, вследствие наличия в этой области исходных дефектов структуры, способствует концентрации действующих механических напряжений. В качестве исходных дефектов могут выступать: включения чужеродных атомов, избыточные либо недостающие протоны, ориентационные L и D дефекты Бьеррума и т. д.

Поскольку каждый образующийся субмикроразрыв обуславливает локальное перераспределение напряжений и их концентрацию в окрестности, то процесс образования таких разрывов нарастает лавинообразно в охваченной ими области исходная кристаллическая структура разрушается на отдельные микроблоки. При этом объединения субмикроразрывов происходят, естественно, не только по базисным плоскостям, но и с рессечением слоев гексагональных колец, когда концентрация напряжений становится достаточной для разрыва связей внутри кольца. Объединение субмикроразрывов по внешней границе рассматриваемой области формирует реальные борты зародыша образующейся микротрещины.

Не рассматривая пока дальнейший процесс развития МТ, остановимся на преобразовании оставшихся внутри нее микроблоков. В результате высвобождения энергии деформации, затрачиваемой на образование новых поверхностей (свободная поверхностная энергия) и частично диссипирующей в объеме МТ, обеспечивается резкое возрастание температуры в полости. По оценкам, сделанным в работе [61], всплеск температуры может достигать 300—900 К. Тот факт, что высвобождающая энергия деформации, как правило, превышает величину, требуемую для создания новых поверхностей и развития пластической зоны, отмечается также в работе [30].

Отсюда следует, что диссипирующая часть высвобождаемой энергии деформации, обуславливающая повышение эффективной температуры, одновременно приводит к разрушению субмикроблоков на отдельные молекулы, что формирует газовое заполнение полости в виде водяного пара. В дальнейшем по мере рассеяния тепловой энергии из полости этот пар конденсируется, образуя жидкую пленку по бортам МТ, а в заключительной фазе кристаллизуется. Прямые экспериментальные подтверждения наличия газового заполнения МТ в настоящее время отсутствуют. Однако имеется ряд экспериментальных фактов, не согласующихся с “вакуумным” представлением полости МТ и легко объясняемых с позиций наличия в ней газа.

Следует отметить осциллограммы акустической эмиссии от образующихся МТ [42], где длительность колебательного процесса существенно превышает длительность образования МТ, что позволяет говорить о колебаниях уже стационарной полости МТ, причем, о колебаниях как резонатора с высокой добротностью — порядка 30-40. Такая добротность для линзообразной полости внутри льда может получаться только при наличии газа, для иных условий она не превышает 1+2.

Дополнительно следует отметить эксперименты со взрывными волнами во льду [88], где несоответствие реальной скорости (≈ 2 км/с) известной для льда скорости волн пластичности (3,06 км/с), авторы пытаются объяснить плавлением льда на границах МТ. Однако это малоубедительно из-за структуры “пленочной” воды, которая практически та же, что кристаллов льда, а поэтому не может обусловить выявленное уменьшение скорости. В то же время газовое заполнение полости МТ легко объясняет отмеченный эффект.

Получается, что применительно к такому материалу, как лед, наиболее вероятными являются условия газового искрового разряда с релаксацией зарядов, разделившихся по бортам в процессе образования МТ. При этом ряд механизмов, характерных для других видов диэлектриков и рассмотренных выше, с точки зрения выделяемой мощности ЭМИ, могут считаться второстепенными.

Формирование ЭМИ при разрядной релаксации зарядов. Представим МТ в продольном сечении в виде линзы (рис. 11 а) длиной a , максимальной толщиной d_n и углом при вершине 2α . Ввиду малости α можно считать

$\sin \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha \cong \frac{d_n}{a}$. В результате разрыва водородных связей по бортам МТ произошло разделение зарядов. Представим, что в центральной области S (см. рис. 11, б) сосредоточен положительный заряд с поверхностной плотностью σ_s , а в области S' — отрицательный заряд с таким же значением плотности.

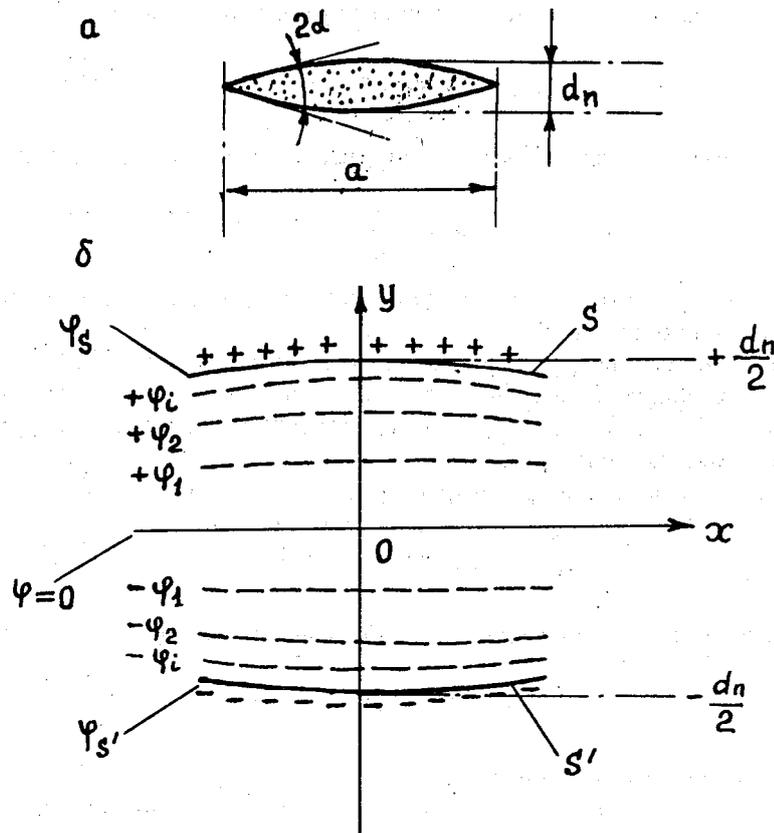


Рис 11. Схема формирования электрического поля в микротрещине

Считая, что свободные заряды внутри полости отсутствуют и пренебрегая кривизной областей S и S' и неоднородностью поля внутри системы, воспользуемся уравнением Лапласа в форме

$$\frac{d^2 \varphi}{dy^2} = 0, \quad (8)$$

где φ — потенциал.

Для системы зарядов, показанных на рис. 11 б, потенциал φ при $y=0$, будем считать равным нулю. В таком случае решение уравнения (8) может быть представлено в виде

$$\varphi = -\frac{\sigma_s y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \text{ при } x=0. \quad (9)$$

При этом разность потенциалов между поверхностями S и S'

$$U = \varphi_{S'} - \varphi_S = \frac{\sigma_s d_n}{\epsilon_0 \epsilon_r}. \quad (10)$$

Напряженность электрического поля в рассматриваемой области при $x=0$

$$E_y = -\text{grad}_y \varphi = \frac{\sigma_s}{\epsilon_0 \epsilon_r}, \quad (11)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_r — диэлектрическая проницаемость среды внутри полости МТ.

При учете кривизны поверхностей S и S' можно выделить касательную составляющую $E_k \cong E_y \sin \alpha$, действующую на заряды на этих поверхностях и обуславливающую их перемещение от центра к периферии МТ, т.е. практически к устьевым зонам.

Скорость перемещения зарядов с учетом их подвижности μ_n

$$V_k \cong \frac{\mu_n \sigma_s \sin \alpha}{\epsilon_0 \epsilon_r}. \quad (12)$$

Время перемещения зарядов из центральной области к устью составит

$$\tau' \cong \frac{a \epsilon_0 \epsilon_r}{2 \mu_n \sigma_s \sin \alpha} \quad (13)$$

при сохранении составляющей E_k .

Рассмотрим простейшую ситуацию, когда при перемещении заряженной области к устью сохраняется величина поверхностной плотности зарядов σ_s . В этом случае сохранятся также значения потенциалов на бортах φ_s и $\varphi_{s'}$, а напряженность поля в приустьевой области будет следующей:

$$E_H = \frac{\sigma_s d_n}{\epsilon_0 \epsilon_r d_y}, \quad (14)$$

где d_y — толщина трещины в приустьевой области.

Поскольку при $x \rightarrow \pm a/2$ значение $d_y \rightarrow 0$, то $E_H \rightarrow E_n$, где E_n — пробойная напряженность поля для газа. Таким образом, если в результате образования микротрещины произошло разделение зарядов по ее бортам, то даже в рассмотренной простейшей ситуации это закономерно приво-

дит к возникновению искрового разряда в устье при толщине разрядного промежутка

$$h'_p \cong \frac{\sigma_s d_n}{\varepsilon_0 \varepsilon_r E_n} \quad (15)$$

Следует отметить, что принимавшиеся выше упрощения обеспечивают наименее благоприятные условия для такого разряда. В частности, в реальной ситуации трудно ожидать, что разделение зарядов происходит только в центральной области МТ и отсутствует на периферии. Более вероятно исходное равномерное их разделение, при этом составляющая напряженности E_k обеспечивает их перераспределение с концентрацией на периферии, благодаря чему напряженность E_H в соответствии с выражением (14) нарастает с удалением от центра значительно быстрее (за счет возрастания σ_s), чем в рассмотренном упрощенном случае. Аналогично более быстрому нарастанию E_H способствуют отклонения МТ от линзообразной формы (реальная трещина прорастает не во все стороны, а лишь в некотором одном направлении, сохраняя по нормали к этому направлению приближенное постоянство размера), а также топография поверхности полости.

Влияние первого из отмеченных факторов очевидно, второй же фактор обуславливает концентрацию зарядов на выступах поверхности, приводя к локальному возрастанию напряженности в зоне преобладающего выступа. В частности, весьма важное значение для концентрации зарядов имеет форма устьевое участка МТ (рис. 12), обусловленная закономерностями своего прорастания и обычно представляемая как модель Баренблатта.

Ввиду того, что касательная составляющая напряженности поля E_k претерпевает существенное изменение в областях S_y и S'_y ($E_{k1} \gg E_{k2}$) это приводит к различиям в скоростях стекания зарядов по направлению к устью и обуславливает концентрацию зарядов в этих областях. При этом, благодаря повышению поверхностной плотности зарядов, значение пробойной напряженности E_n достигается при толщине $h_p \gg h'_p$.

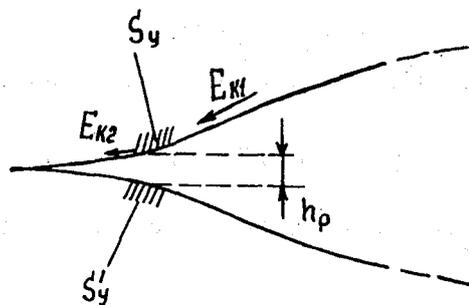


Рис. 12. Устьевой участок МТ с концентрацией зарядов

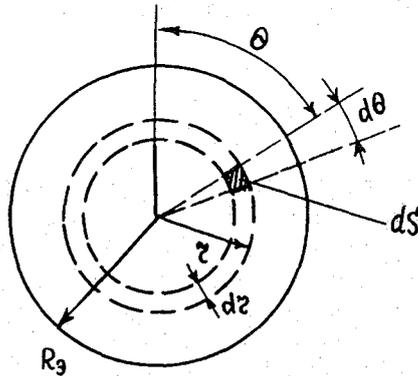


Рис. 13. Схема стекания заряда при его релаксации

В соответствии с такой картиной будем считать, что суммарный релаксирующий заряд Q_p сосредоточивается на некоторой площадке S_p с эквивалентным радиусом R_3 . Оценим для этих условий длительность процесса релаксации в формирующемся искровом разряде. Считая, что скорость движения зарядов в канале разряда существенно превышает их скорость движения по поверхности S_p , будем оценивать длительность релаксации T_c как время, необходимое для стекания полного заряда Q_p с площадки Q_p в канал, сформировавшийся на оси этой площадки.

Рассмотрим некоторый заряд q_p сосредоточенный на элементарном участке dS (рис. 13). Движение заряда q_i обеспечивается под воздействием радиальной составляющей электрического поля E_r , которую приближенно можно выразить в виде

$$E_r \cong \frac{r h_p E_p}{r^2 + h_p^2}, \quad (16)$$

где E_p — напряженность поля в канале разряда; h_p — длина канала.

При поверхностной плотности $\sigma_{sp}(r, \theta)$ заряд q_i равен

$$q_i = r \sigma_{sp}(r, \theta) dr d\theta,$$

а суммарный заряд кольца с внутренним радиусом r и толщиной dr составляет

$$Q_r = \int_0^{2\pi} r \sigma_{sp}(r, \theta) dr d\theta. \quad (17)$$

Полный заряд Q_p всей поверхности с радиусом R_3 , релаксирующий в течение времени T_c

$$Q_p = \int_0^{R_3} \int_0^{2\pi} r \sigma_{sp}(r, \theta) dr d\theta. \quad (18)$$

Время T_C , за которое происходит стекание заряда Q_p с поверхности радиусом R_3 к ее центру в канал разряда, выразим в виде

$$T_C = \frac{1}{Q_p} \int_0^{R_3} \int_0^{2\pi} \frac{r(r^2 + h_p^2)}{\mu_n E_p h_p} \sigma_{sp}(r, \theta) dr d\theta, \quad (19)$$

где μ_n — подвижность зарядов.

Для упрощения задачи считаем $\sigma_{sp}(r, \theta) = \text{const}$. В этом случае

$$T_C = \frac{2\pi\sigma_{sp}}{Q_p} \int_0^{R_3} \frac{r(r^2 + h_p^2)}{\mu_n E_p h_p} dr. \quad (20)$$

Окончательное решение получается в виде

$$T_C = \frac{R_3^2 + 2h_p^2}{2\mu_n E_p h_p} \quad (21)$$

с учетом того, что $\pi R_3^2 \sigma_{sp} = Q_p$.

Величина E_p в процессе разряда уменьшается. Для выполнения оценок по выражению (21) зададим ее изменения в виде

$$E_p = (E_n - E_0) \exp\left[-\frac{\tau}{T_C - \tau}\right] + E_0, \quad (22)$$

где E_0 — значение напряженности поля по оси канала после прекращения разряда; τ — время в интервале $0 \leq \tau \leq T_C$.

Величину R_3 определим из следующих соображений. Допустим, что заряд Q_p собирается с полукруга поверхности МТ при исходной поверхностной плотности разделенных зарядов σ_s . Тогда $Q_p = \frac{1}{8} \pi a^2 \sigma_s$. На рассматриваемой площадке плотность $\sigma_{sp} \cong \epsilon_0 \epsilon_r E_n$. В таком случае

$$R_3 \cong \sqrt{\frac{a^2 \sigma_s}{8 \epsilon_0 \epsilon_r E_n}}. \quad (23)$$

Из выражений (21) и (23) следует, что длительность T_C в значительной мере зависит от размера микротрещины a и от длины разрядного промежутка h_p . Оценки T_C , выполненные для различных условий (рис. 14) показывают, что зависимость от a наиболее существенна при малых значениях h_p у больших МТ ($a \approx 4-5$ мм). Однако вероятность таких трещин велика, поскольку при реальных деформациях кристаллов льда значительную роль играют сдвиговые напряжения, ограничивающие развитие

МТ в направлении длинной оси. Это обуславливает преимущественное формирование микротрещин со значениями a порядка 1—3 мм, что предопределяет наиболее вероятный диапазон изменчивости T_c , выделенный на рис. 14.

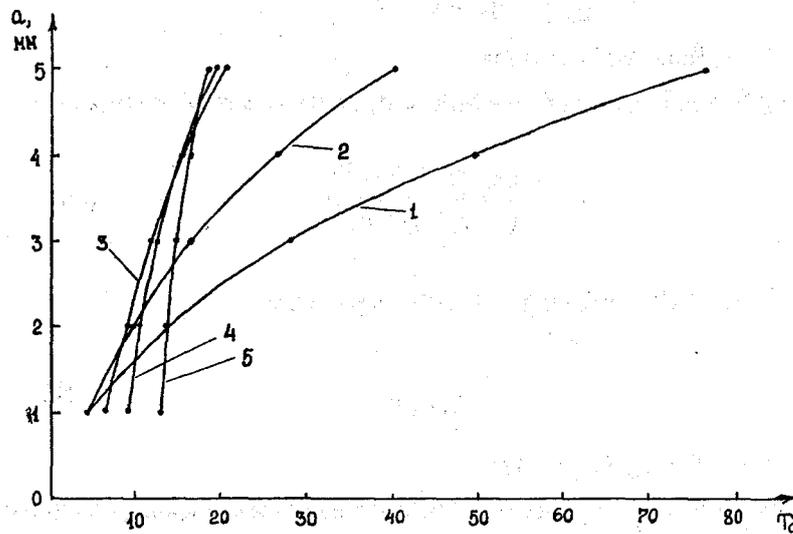


Рис. 14. Длительность релаксации зарядов при изменчивости условий в МТ: 1 — $h_p=0,01$ мм; 2 — $h_p=0,02$ мм; 3 — $h_p=0,05$ мм; 4 — $h_p=0,07$ мм; 5 — $h_p=0,1$ мм; $\sigma_s=1 \cdot 10^{-7}$ Кл/м²

Мощность, выделяемую при релаксации зарядов в одном разряде оценим по выражению

$$N_n + N_0 = \frac{1}{T_c} \int_0^{V_n} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E_p^2}{2} dV, \quad (24)$$

где V_n — полный объем, занимаемый исходным электрическим полем; N_0 — дефицит мощности, возникающий из-за нерелаксировавших зарядов после прекращения разряда.

Считая, что $V_n \cong \pi R_s^2 h_p$, E_p мало зависит от V , а $N_0 \ll N_n$, получим

$$N_n \cong \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_s^2 E_p^2 h_p}{2 T_c}. \quad (25)$$

Оценки по выражению (25), сделанные для наиболее вероятного диапазона условий формирования МТ, дают значения порядка $10^{-5} \div 10^{-4}$ В. Это существенно выше, чем при ранее рассмотренных механизмах и, по-видимому, является определяющим в формировании электромагнитного излучения при микротрещинообразовании во льду.

Дополнительно следует отметить, что при отсутствии газового заполнения МТ формирование разряда также может происходить, но не в результате пробоя газа, а в результате автоэлектронной эмиссии. Разряд в этих условиях происходит при напряженности порядка 10^9 В/м. При этом наиболее вероятный максимум возможного спектра ЭМИ смещается в более высокочастотную область, а требуемое для разряда локальное накопление зарядов (порядка 10^{-2} Кл/м²) возможно лишь в довольно крупных микротрещинах ($a > 5$ мм). Тем самым результирующая интенсивность ЭМИ значительно уменьшается по сравнению с условиями газового заполнения МТ. Образование подобных вакуумированных МТ возможно в некоторых видах диэлектриков (например, стекло, керамика и др.), однако применительно к морскому льду это маловероятно, поскольку, кроме рассмотренных ранее особенностей льда (сравнительно “легкое” плавление микрообломков внутри полости МТ), при отмеченных размерах ($a > 5$ мм) большинство микротрещин, как правило, перестают быть внутрикристаллическими, т.е. захватывают заполненную рассолом межкристаллическую прослойку, уже самим этим фактом отрицая возможность вакуумированного состояния МТ и автоэлектронной эмиссии.

Основные выводы рассмотренной модели подтверждены экспериментально как лабораторными экспериментами, описанными, например в работе [26], так и при натуральных исследованиях [12, 19, 46, 47, 49, 77].

Несомненно, что рассматриваемые физические процессы и их теоретическое описание требуют дальнейших исследований. При этом необходимо учитывать тип кристаллической структуры льда, размеры кристаллов, состав рассола в межкристаллических прослойках и т.д. Особенно важным представляется наличие либо отсутствие исходной электрической поляризации льда, влияние которой теоретически рассматривается ниже.

Влияние исходной поляризации льда на формирование ЭМИ при микротрещинообразовании. В рассмотренной выше модели формирования ЭМИ радиодиапазона процесс разделения электрических зарядов по бортам свежееобразующихся микротрещин считался обусловленным только термодинамической неравновесностью распределения зарядов в объеме кристалла. При этом возможное наличие исходных статических электрических полей внутри объема (исходная поляризация) не принималось во внимание.

Однако в реальном ледяном покрове действуют, как минимум, два дисперсионных механизма, обуславливающих исходную поляризацию. Первый из них характерен для льда, находящегося в стадии образования и состоит в разделении зарядов между твердой и жидкой фазами, при этом для объема льда характерен неравномерно распределенный по вертикали избыточный положительный заряд. Этот эффект, известный в литературе как *термодиффузионно-электрический* [48], а также как *эффект Воркмана—Рейнольдса*, довольно полно исследован. Межфазная разность потенциалов в результате термодиффузионно-электрического эффекта может достигать порядка 10^{-2} В, а плотность зарядов вблизи фронта кристаллизации — $10^{-5}+10^{-2}$ Кл/м².

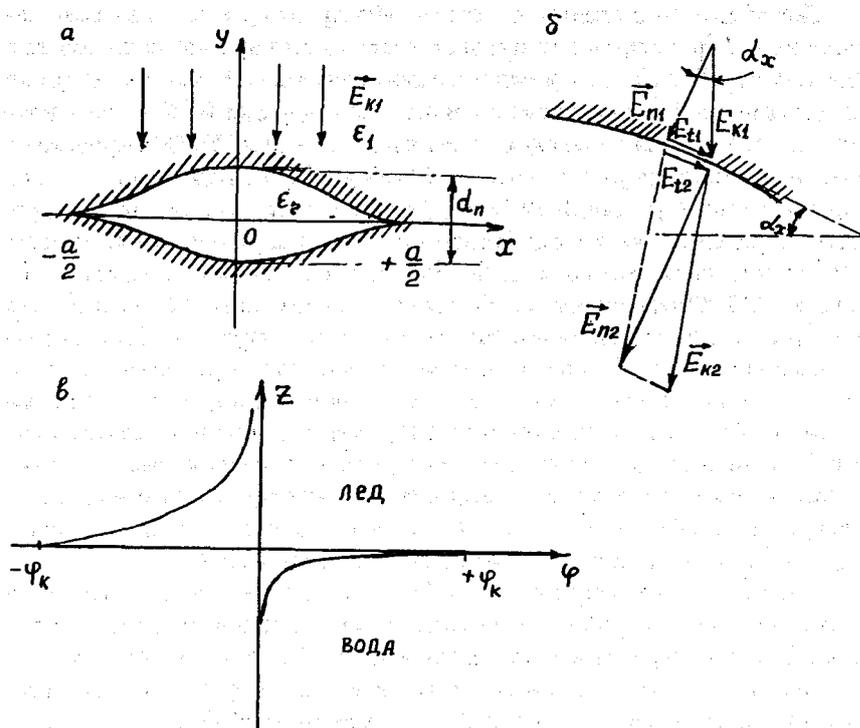


Рис. 15. Полость МТ в исходном электрическом поле

Второй механизм связан с зарядением верхней поверхности льда за счет так называемого *трибоэлектрического эффекта* (зарядение при трении) при метелевом переносе [64]. Напряженность поля над метелевым слоем может достигать 10^4 В/м.

Существование исходной поляризации в деформирующемся льду, во-первых, может существенно облегчать условия разделения зарядов по бортам микротрещин, что приводит к возрастанию интенсивности ЭМИ радиодиапазона, а во-вторых, может самостоятельно приводить к появлению локальных электрических полей в МТ со значениями напряженности, характерными для газового пробоя при нормальных условиях, т.е. порядка $3 \cdot 10^6$ В/м. Такой характер влияния исходного поля обуславливается тем, что оно как бы стягивается в полость свежееобразующейся МТ, значительно возрастая по величине. Физическая сущность подобного стягивания может быть представлена следующим образом.

Рассмотрим линзообразную микротрещину (рис. 15), внутри которой находится газовая среда с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 . Будем считать, что МТ образовалась при наличии во льду исходного электрического поля с напряженностью E_{k1} . Статическая диэлектрическая прони

цаемость льда $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$. Вектор электрического поля E_k установим направленным по оси трещины. Для некоторой произвольной площадки dS (см. рис. 15 б) оценим соотношения между составляющими вектора E_k внутри и вне полости. Ввиду того, что толщина МТ d_n намного меньше ее длины a , фактор деполяризации поля можно считать пренебрежимо малым.

В силу условия непрерывности на границах сред с различными значениями диэлектрической проницаемости касательные составляющие E_{n1} и E_{n2} должны быть равны между собой. В силу того же условия равны нормальные составляющие вектора электрической индукции $D_{n1} = D_{n2}$. Отсюда следует

$$E_{k1} = E_{k2} \sqrt{1 + \cos^2 \alpha_x \left(\frac{\epsilon_1^2}{\epsilon_2^2} - 1 \right)}, \quad (26)$$

где E_{k1} — модуль напряженности поля во льду; E_{k2} — модуль напряженности поля внутри полости.

Как следует из выражения (26), максимальное изменение напряженности исходного поля наблюдается при $\alpha_x \rightarrow 0$, т.е. вблизи центра МТ и в приустьевых участках (см. рис. 15 а) и составляет

$$E_{k2}^{\max} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_{k1}. \quad (27)$$

В работе [10] было показано, что статическая диэлектрическая проницаемость свежеобразовавшегося льда достигает 10^3 - 10^4 . Поскольку $\epsilon_2 \gg 1$, то в соответствии с выражением (27) напряженность поля внутри полости возрастает в 10^3 - 10^4 раз по сравнению с исходной.

Эффект “стягивания” электрического поля в область аномалий диэлектрической проницаемости, по-видимому, может играть существенную роль в явлении формирования импульсного ЭМИ при кристаллизации воды, обнаруженном в лабораторных экспериментах [48].

Здесь следует отметить, что эффект “стягивания” наиболее существенен именно для микротрещин, т.е. для таких полостей, толщина которых намного меньше длины, и расположенных в плоскости, нормальной к вектору исходной поляризации ($\alpha_x \rightarrow 0$, а $\cos^2 \alpha_x \rightarrow 1$). При невыполнении хотя бы одного из условий роль эффекта резко снижается.

Действительно, рассмотрим характерную ситуацию, когда вблизи фронта кристаллизации захвачен пузырек воздуха. В этом случае нельзя пренебрегать фактором деполяризации и напряженность поля внутри пузырька будет определяться выражением

$$E_{k2} = E_{k1} - k_p P, \quad (28)$$

где E_{k1} — вектор напряженности поля во льду; k_p — коэффициент деполяризации; P — вектор поляризации пузырька.

Если рассматривать пузырек как сферу, заполненную газом с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , то можно воспользоваться решением, известным в задачах электростатики [29]

$$E_{k2} = \left(1 - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}\right) E_{k1} \quad (29)$$

т.е. при $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$ значение E_{k2} не более чем в 1,5 раза превышает E_{k1} . Тем самым в пузырьках не обеспечивается сверхусиления поля, как в микро-трещинах.

Роль расположение МТ по отношению к вектору E_{k1} наглядно видна непосредственно из выражения (28), если исключить условие перпендикулярности E_{k1} к оси трещины и рассматривать полное значение α_x как угла между площадкой dS и нормалью к E_{k1} . В таком случае при прорастании МТ по вектору E_{k1} поле внутри трещины оказывается таким же, как и вне ее ($\alpha_x \rightarrow 90^\circ$, $\cos \alpha_x \rightarrow 0$), т.е. эффект стягивания не проявляется.

Очевидно, что сделанные выводы применимы не только к поляризации с распределением заряда по нижней (при кристаллизации) либо по верхней (при метелевой электризации) поверхностям ледяного покрова, но и также при наличии внутриобъемных заряженных областей. Приблизительно рассматривая такую область как сферу радиусом R_c напряженность поля внутри этой сферы можно получить путем решения уравнения Гаусса

$$\oint_S \mathbf{D} dS = \int_0^V \rho_v dV, \quad (30)$$

где $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_1 \mathbf{E}$ — вектор электрической индукции; dS — элемент поверхности сферы; ρ_v — объемная плотность зарядов внутри сферы; V — объем.

При $\rho_v = \text{const}$ решение получается в виде

$$\mathbf{E}(r) = \frac{\rho_v \mathbf{r}}{3\epsilon_0 \epsilon_1} \quad \text{при } r < R_c \quad (31)$$

Будем считать, что заряженная область создана ориентационными дефектами, например, типа D . Поскольку заряд дефекта равен $0,6e$, то, оценивая их общее количество как один дефект на 10^{10} молекул при объеме $0,03 \text{ нм}^3$, занимаемом одной молекулой, получим значение $\rho_v = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$. Эта оценка достаточно осторожна. По данным Маскаренаса [15] в твердой фазе может аккумулироваться заряд плотностью до 10^{-2} Кл/г , т.е. на несколько порядков больше. Экспериментально зарегистрированы также существенно большие значения объемной плотности аккумулированных зарядов при кристаллизации воды во внешнем электрическом поле — до $0,14 \text{ Кл/м}^3$ [15].

С учетом этих данных выполненные по выражению (31) оценки также приводят к значениям напряженности поля внутри полости МТ, образующейся, например, на периферии заряженной области, близким к E_n .

Рассмотренный эффект сверхусиления электрического поля на плоских границах раздела лед—газ должен проявляться не только в МТ, но и на верхней поверхности свежобразованного льда. Причем, если нормальная к поверхности составляющая электрического поля достигает значений порядка E_n , то, как следствие этого, в области раздела возникает холодная эмиссия с приповерхностной ионизацией воздуха и соответственно — непрерывное излучение в оптическом диапазоне (свечение поверхности). Такое свечение зарегистрировано экспериментально [83] и является фоном для импульсных световых вспышек, связанных с разрядами внутри МТ в объеме льда.

Кроме рассмотренного механизма, исходная поляризация льда в общем случае способствует усилению трибоэлектрического заряжения бортов образующихся МТ, а также создает условия для большей концентрации зарядов в области последующего пробоа. Действительно, при образовании МТ в таких условиях (по нормали к вектору исходного поля) происходит разрыв уже поляризованных водородных связей, и зарядение бортов в большей степени обуславливается этим фактором, чем термодинамической неравновесностью. Разделенные по бортам заряды, создавая собственное электрическое поле, направленное противоположно исходному, ослабляют эффект “стягивания”, задерживая разряд до момента такой концентрации зарядов, которая при суммировании полей обеспечит условия пробоа. При этом релаксирует существенно больший суммарный заряд, что приводит к возрастанию мощности ЭМИ и увеличению длительности каждого элементарного импульса, т.е. к расширению спектра в низкочастотную область.

При реализации методов инструментальной авиаразведки сжатий, основанных на регистрации собственного ЭМИ деформирующегося льда, рассмотренные особенности требуют обязательного учета, в частности, при выборе частотного диапазона регистрации над ниласовыми льдами, а также в условиях метелевой электризации поверхности.

Дальнейшие исследования влияния исходной поляризации на процесс формирования ЭМИ во льду могут дать основу для разработки авиаметодов определения зон кристаллизации на акватории, а также методов выделения возрастных категорий деформирующегося льда.

2.2.2. Принципы картирования распределения механических напряжений (сжатий) с авиасредств ледовой разведки

Как следует из вышерассмотренных данных, при механических напряжениях во льду, превышающих предел длительной ползучести (σ_{∞}) и характеризующих собственно сжатия (≥ 1 балла) происходит возбуждение естественного электромагнитного поля преимущественно в СДВ диапазоне за счет формирования коротких искровых электрических разрядов во внутрикристаллических и транскристаллических микротрещинах. Количество образующихся микротрещин и соответственно количество электрических разрядов и суммарная мощность излучения связаны с действующим механическим напряжением.

Введем понятие частоты формирования МТ под действием механической нагрузки

$$v = \int_0^V \frac{\partial N}{\partial \tau} dV, \quad (32)$$

где N — количество микротрещин; τ — время; V — объем деформирующегося льда.

На некоторой высоте H_n над поверхностью ледяного покрова результирующее поле создается совокупностью искровых разрядов в МТ, распределенных как по объему льда, так и во времени. Поскольку $V = \pi l L^2$, где l — толщина льда, а L — радиус поверхности, формирующей результирующее поле, то при условии $L \ll H_n$ и при H_n в пределах 100—300 м изменчивостью действующей нагрузки в большинстве случаев можно пренебречь, считая $\sigma(V) = \bar{\sigma}$. Также считая, что количество микротрещин соответствует количеству импульсов акустической эмиссии, можно записать

$$v = \frac{\pi L^2 N_0 \bar{X}(T) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_\infty} - 1 \right)}{3\sqrt[3]{\theta_\tau^2}} \exp \left[\bar{X}(T) \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_\infty} - 1 \right) \sqrt[3]{\theta_\tau} \right], \quad (33)$$

где θ_τ — промежуток времени, прошедший от начала действия нагрузки.

Будем считать процесс формирования МТ в объеме льда V случайной функцией времени с равновероятным законом распределения. Тогда при условии $v T_c \gg 1$ в случайной последовательности импульсов ЭМИ, формируемой объемом, всегда можно выбрать такие последовательности, где импульсы следуют с интервалом $0,8 T_c$, т.е. обеспечивается непрерывное излучение на частоте $f = 1,25 T_c^{-1}$. Поле в точке регистрации является результатом сложения выбранных последовательностей с учетом их фаз и ориентации векторов E и H (напряженностей электрического и магнитного полей).

Оценку мощности результирующего непрерывного ЭМИ от деформирующегося ледяного покрова выполним с учетом следующих соображений. Высвобождаемая энергия отдельных импульсов не может поглощаться никакими сопутствующими процессами, кроме значительной диссипации в тепловую. Тем самым результирующая мощность излучения льда как источника является алгебраической суммой мощностей отдельных импульсов ЭМИ от МТ и может быть оценена выражением

$$\bar{N}_p \cong 0,8 v T_c N, \quad (34)$$

где N_p — мощность, выделяемая отдельным разрядом.

Удельная мощность, излучаемая единичной поверхностью ледяного покрова, составляет

$$\overline{N_p^{yb}} \cong \frac{0,25vT_c N_n}{L^2}. \quad (35)$$

Поскольку мощность $\overline{N_p}$ непрерывного источника излучения пропорциональна квадрату напряженности поля $N_p \sim E_m^2$, то в силу зависимостей (33) и (34) значение E_m оказывается функцией средней величины действующего механического напряжения σ при даном θ . Окончательное установление вида этой зависимости наиболее целесообразно для конкретных видов льда и должно определяться экспериментально.

Для общего случая следует отметить, что зависимость получается нелинейной также нелинейна взаимосвязь между первой степенью напряженности поля и действующим механическим напряжением. Однако, как всегда, любую нелинейную функцию можно разложить в степенной ряд и оценить некоторую степень нелинейности, оценив отношение суммы квадратичного и последующих членов разложения к линейной части функции. Для рассматриваемой зависимости в диапазоне реальных условий это отношение не превышает 5%. Распределение поля излучения над деформируемым ледяным покровом может быть приближенно оценено в соответствии с характером излучения отдельной МТ.

Представим каждый искровой разряд в МТ как электрический диполь с геометрической длиной h_p . Длина волны излучения такого диполя получается следующей:

$$\lambda_u = 1,25CT_c, \quad (36)$$

где C — скорость распространения.

Соответственно, для формирующегося диапазона частот излучения ледяного покрова длина волны оказывается на несколько порядков превышающей расстояние h между диполем и проводящей поверхностью морской воды. Для таких условий ($h \ll 0,25\lambda_u$) поле излучения диполя является остро направленным [50], причем максимум диаграммы направленности располагается по нормали к поверхности моря.

В результате всего сказанного получается, что деформирующиеся участки ледяного покрова излучают преимущественно вверх, лишь часть энергии излучения, в частности, за счет боковых лепестков диаграммы направленности, рассеивается в стороны. Эта особенность чрезвычайно важна, поскольку именно благодаря ей становится возможным осуществлять географическое картирование зон излучения и соответственно — характеристик сжатий с авиаразведки. На некоторой постоянной высоте над морем (порядка 100—100 м) из-за наличия направленности излучения повышенные значения напряженности регистрируются только непосредственно над зонами деформаций.

Учитывая, что нелинейность взаимосвязи между действующим механическим напряжением и напряженностью возбуждаемого электромагнитного поля, как отмечалось выше, не превышает 5%, можно для практических целей картирования записать выражение

$$\sigma_n = S \left(\frac{E_n - E_\phi}{E_\infty} \right), \quad (37)$$

где E_n — измеряемая над ледяным покровом напряженность возбуждаемого электромагнитного поля; E_ϕ — фоновая напряженность электромагнитного поля в выбранной для картирования полосе частот; E_∞ — напряженность, возбуждаемая во льду данного вида при действии механических напряжений, соответствующих пределу прочности льда; S — эмпирический коэффициент связи, зависящий от высоты полета авиасредства, полосы выбранных частот и от физико-химических и физико-механических свойств деформирующегося льда. Оценки коэффициента S необходимы для каждого конкретного региона выполнения наблюдений. В качестве примера можно привести значение для Печорской губы — $\sim 6,5 \cdot 10^6$ Па при E_∞ порядка 15–20 мВ/м и высоте полета 100 м.

Фоновая напряженность поля в используемом диапазоне частот преимущественно формируется грозовой деятельностью в средних и южных широтах, т.е., как правило, источники фонового излучения удалены от районов выполнения измерений на несколько тысяч километров. Тем самым эти измерения выполняются в так называемой *волновой* зоне фоновых источников, где градиенты малы и уровень *естественной* части E_ϕ может считаться практически постоянным в пределах района разведки 100–200 км. Причем, значение этого уровня с достаточной корректностью определяется над зонами, где гарантировано отсутствие излучений от поверхности, в частности, над берегом на удалении от береговой черты 3–5 км.

При удлинении маршрута разведки целесообразно выполнять периодический контроль уровня фона и соответственно учитывать его изменчивость по району. Зонами в открытом море, над которыми гарантировано отсутствие излучения от поверхности в используемом диапазоне, являются зоны с чистой водой или дрейфующим льдом сплоченностью менее 9 баллов.

Кроме *естественной* части фона в реальных условиях Арктики в величину E_ϕ как составная часть может входить излучение местных либо удаленных станций [78], работающих в используемом частотном диапазоне. Это излучение, как правило, узкополосное и при выявлении источника полностью отфильтровывается применением в измерительной аппаратуре специальных “фильтров-пробок”.

Получаемые при авиаразведке значения σ_n представляют собой не что иное, как значения модулей действующих напряжений. Направление вектора напряжений здесь не может определяться непосредственно. Обработка же данных, нанесенных на карту, позволяет получать все требуемые характеристики сжатий, в том числе — расположение осей сжатий, зон концентрации напряжений и т.д.

2.2.3. Измерительные средства, применяемые при регистрации собственного ЭМИ деформирующихся льдов

Простейший вариант комплекса измерительной аппаратуры, применяющейся для регистрации собственного ЭМИ льдов с авиасредств ледовой разведки приведен на рис. 16. Аппаратура содержит измерительный преобразователь (ИП) напряженности ЭМИ 1, подсоединенный к предварительному широкополосному усилителю 2, выходной сигнал которого по линии связи 3 подается на устройство измерения и регистрации 4.

Конструктивно объединенные в единый узел измерительный преобразователь 1 и предусилитель 2 при проведении измерений располагаются вне фюзеляжа самолета (вертолета) на демпфированной подвеске. Устройство 4 располагается внутри фюзеляжа и содержит последовательно соединенные усилители 5 и 7, перестраиваемый активный полосовой фильтр 6, схему детектирования сигнала 8 и регистратор 9.

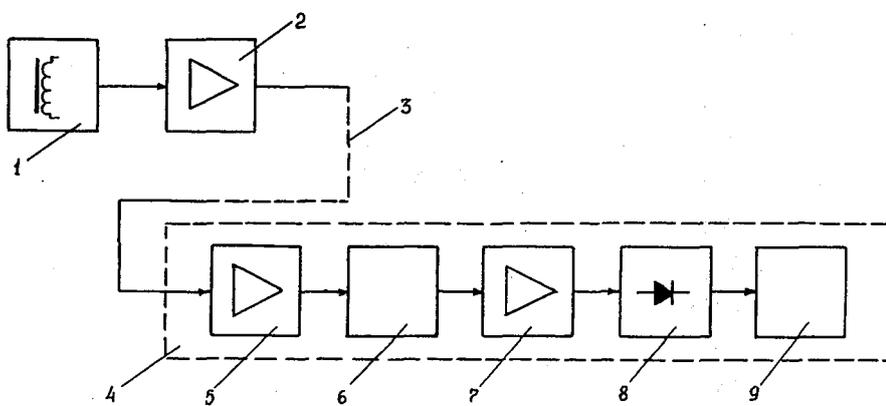


Рис. 16. Функциональная схема измерительного комплекса

В качестве измерительного преобразователя наиболее целесообразно использовать магнитный диполь, согласуя его чувствительность с уровнем собственных шумов предварительного усилителя. Например, несложно обеспечивается сочетание: чувствительность диполя 2—3 мкВ (мВ/м), уровень собственных шумов предусилителя — 0,3 мкВ.

Поскольку деформируемый ледяной покров как источник излучения характеризуется широкополосностью, то узкая избирательность в измерительной установке нецелесообразна. В связи с этим ИП подключается к входу предусилителя непосредственно, а не в варианте LC контура. Выделение требуемой полосы осуществляется в блоке фильтров 6. При этом учитываются следующие особенности.

Чувствительность ИП в виде магнитного диполя является функцией частоты

$$S = \frac{dU_a}{dH_m} = \omega w_k S_k \mu_0 \mu_{эф} \cos(\mathbf{H}, \mathbf{n}), \quad (38)$$

где U_a — амплитудное значение напряжения на зажимах ИП; w_k — число витков; S_k — площадь сечения сердечника; (\mathbf{H}, \mathbf{n}) — угол между вектором \mathbf{H} и осью сердечника \mathbf{n} ; ω — круговая частота регистрируемого поля; μ_0 — магнитная постоянная; $\mu_{эф}$ — эффективная магнитная проницаемость; H_m — амплитудное значение напряженности магнитной составляющей регистрируемого поля.

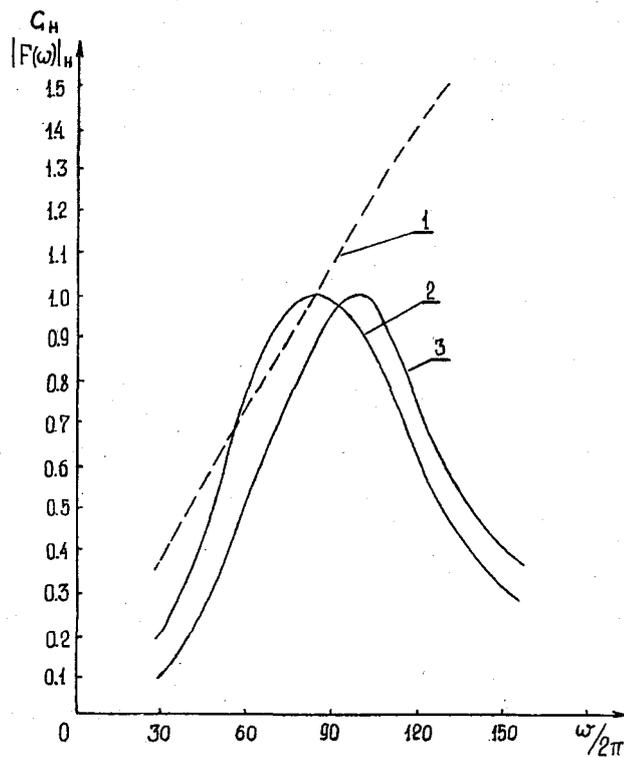


Рис. 17. Характеристики чувствительности и амплитудно-частотные характеристики измерительного устройства

В выбираемой полосе частот изменчивость чувствительности весьма существенна (рис.17). При этом результирующая амплитудно-частотная характеристика определяется сочетанием характеристики чувствительности вида 1 и характеристики пропускания 2 активного полосового фильтра в устройстве измерения и регистрации и получается в виде 3. В связи с этим исходная настройка фильтра осуществляется для такой смещенной полосы, чтобы результирующая амплитудно-частотная характеристика

(АЧХ) вида 3 соответствовала требуемому диапазону частот. Усиленный сигнал подвергается детектированию в схеме 8 (см. рис. 16), где выделяется его огибающая, пропорциональная эффективному значению напряженности поля. Кроме фильтрации несущей, в схеме целесообразно также дополнительное сглаживание огибающей.

Для измерителей, размещаемых на авиасредствах разведки, особым вопросом всегда является питание. Подсоединение к бортовой сети авиасредства, как правило, является проблемой. Если это все же удастся сделать, то обычно приходится применять преобразователи напряжения. Наиболее надежным является применение автономных источников питания.

2.2.4. Регистрация сжатий с авиасредств в дрейфующих льдах и в районе кромки припая

В качестве примеров регистрации далее приводятся данные натуральных измерений в районе Печорской губы Баренцева моря. Измерения выполнялись с самолета АН-2. Полеты осуществлялись в условиях нагонных ветров в Печорскую губу, действующих преимущественно по нормали к кромке припая. Припай полностью занимал всю акваторию Печорской губы, кромка располагалась мористее п-ова Русский Заворот и о-вов Гуляевские кошки. Сроки проведения измерений — зимне-весенний период.

Измерения выполнялись по следующей методике. Измерительный преобразователь с предусилителем устанавливались на подвеске вне фюзеляжа и кабельной линией соединялись с блоком измерения и регистрации. Измерения напряженности велись непрерывно с привязкой скорости развертки регистратора к скорости полета самолета. Постоянная времени фильтра в схеме детектирования сигнала 8 (см. рис. 16) составляла 3 с, что позволяло выявлять тонкую структуру поля действующих механических напряжений.

Кроме прямых измерений напряженности формирующегося при деформационных процессах во льду электромагнитного поля, по маршруту полета выполнялась ледовая авиаразведка по стандартной методике. Данные разведки наносились на карту.

На маршруте по нормали к кромке припая при сжатии дрейфующих льдов в районе кромки 2 балла (рис. 18) возрастание напряженности регистрируемого поля начинает наблюдаться над припаем за 2—3 мили до кромки. Максимум сигнала характерен для самой кромки, при дальнейшем движении над дрейфующим льдом сплоченностью 10 баллов сигнал уменьшается. Подобный характер изменчивости напряженности поля вполне понятен в силу того, что в районе кромки сжатия максимальны.

Полет “косыми” галсами вдоль кромки (рис. 19) при сжатии 2—3 балла подтверждает эту закономерность. Уход от кромки в сторону припая приводит к существенному уменьшению уровня регистрируемого сигнала. Уменьшение сигнала над дрейфующим льдом менее заметно из-за не-

значительных удалений от кромки. Следует также отметить, что сигнал над припаем, в свою очередь, зависит от характеристик поверхности льда (см. рис. 19).

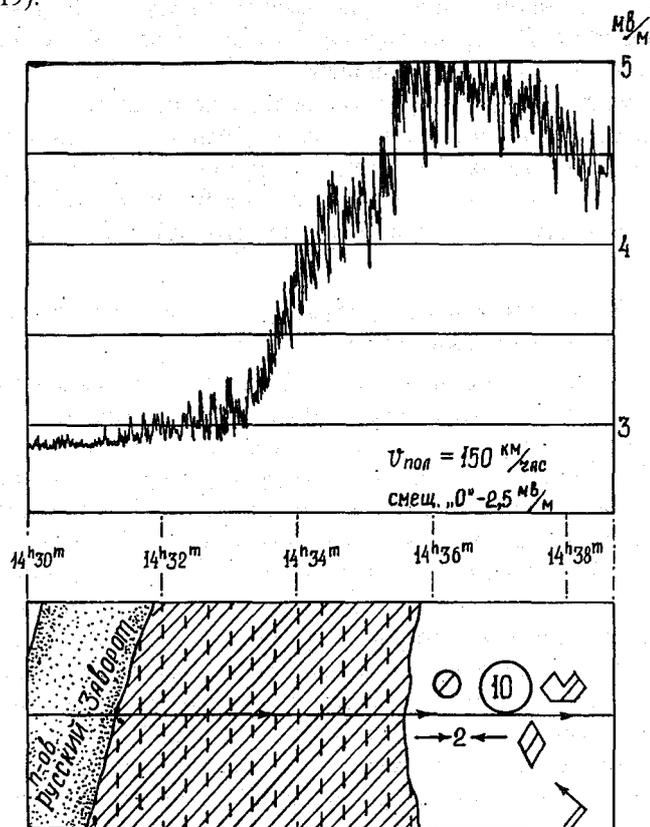


Рис. 18. Пример регистрации сжатий по нормали к кромке припая

По сравнению с уровнем сигналов над зонами сжатий в припае (см. раздел 2.2.5) сигналы над сжатым дрейфующим льдом в целом существенно выше. Эти различия связаны только с различной интенсивностью деформационных процессов в припае и в зоне кромки, а не с какими-либо физическими особенностями эффекта возбуждения электромагнитного поля.

В результатах регистрации напряженности поля над дрейфующим льдом наблюдается сильная "изрезанность", связанная с неоднородностями распределения деформационных процессов. Дрейфующий лед в зоне кромки представлен преимущественно большими ледяными полями и обломками полей (см. рис.19). Естественно, что максимум деформационных процессов наблюдается на стыках таких полей. При узкой вертикальной

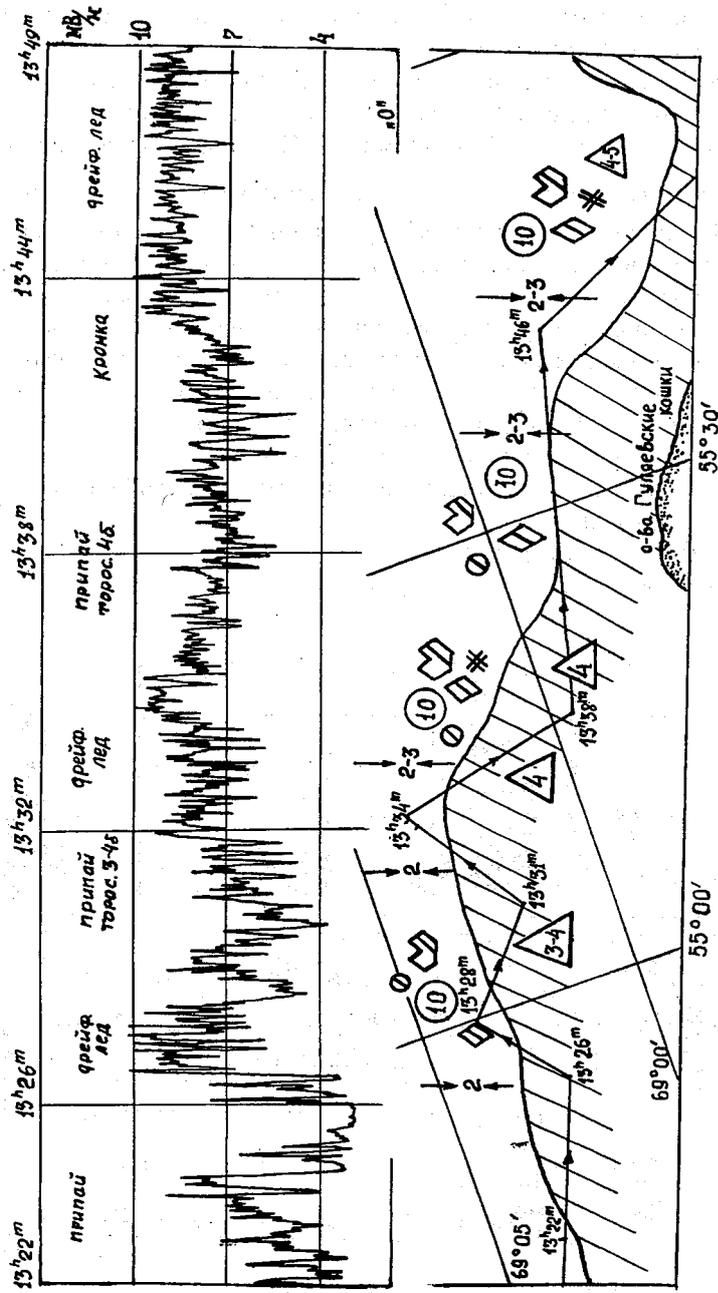


Рис. 19. Пример регистрации сжатий в зоне кромки

направленности диаграммы излучения льда такой характер деформаций приводит к тому, что при малой высоте полета каждый стык полей в условиях сжатий проявляется в данных непрерывной регистрации в виде всплеска напряженности поля.

Эта особенность может использоваться для оценок форм дрейфующего льда (средних размеров) при выполнении авиаразведки "вслепую" (низкая облачность, туман) и при отсутствии РЛС БО на борту авиасредства.

2.2.5. Регистрация характеристик сжатий в припайных льдах

При наличии условий для деформационных процессов в припае, например, при действии нагонного ветра, в ледяном покрове формируется поле напряжений, аналогичное сжатиям в дрейфующих льдах и столь же важное для движения судов и различных инженерно-технических работ. Распределение напряжений преимущественно обуславливается неоднородностями ледяного покрова, обеспечивающими концентрацию напряжений. В частности, такими неоднородностями могут быть:

- границы пресноводного и морского льдов;
- границы льдов различных возрастных категорий и соответственно различной толщины;
- поля и пояса торосов;
- застамушенные мелководные участки; и др.

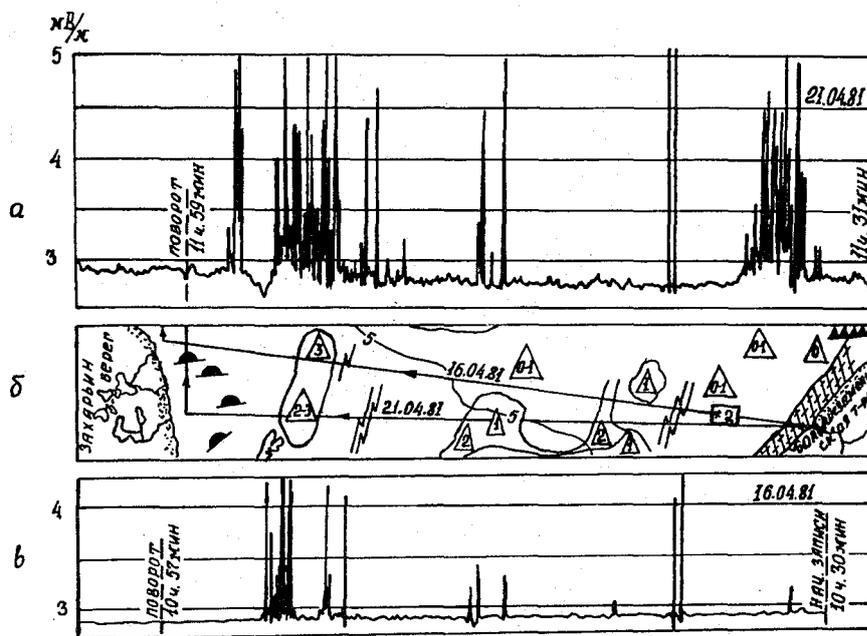


Рис.20. Пример регистрации сжатий в припае на близких галсах со сдвигом во времени

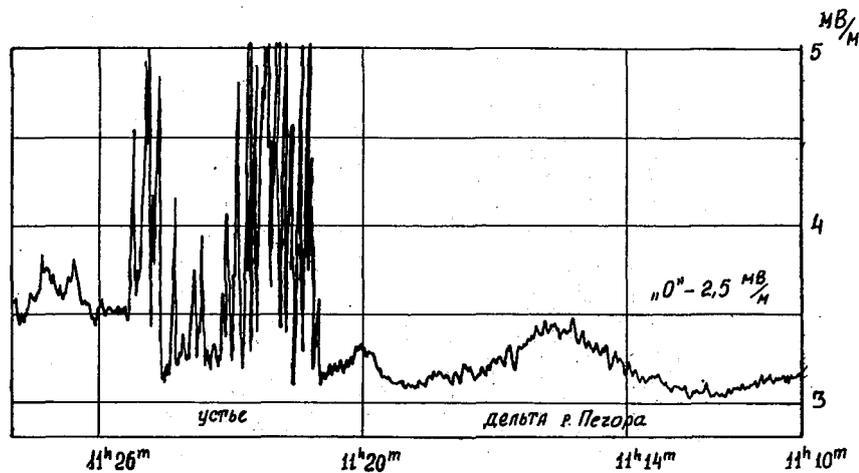


Рис. 21. Сжатия в зоне границы пресноводного и морского льдов

На рис.20 приведен пример регистрации возбуждаемого деформирующимся льдом ЭМИ на географически близких маршрутах в разные периоды времени, но при сходных гидрометеорологических условиях. При съемке 21 апреля напряжения в ледяном покрове создавались вследствие действия в зоне Печорской губы северо-восточного ветра 8—10 м/с, обуславливающего нагон воды. При этом наблюдались интенсивные деформации у берега и в зонах неоднородностей (см. рис.20 а). При съемке 16 апреля наблюдался северный ветер 7—9 м/с, т.е. условия были сходными, однако, интенсивность деформаций в целом по району была существенно меньшей. Эти различия в интенсивности однозначно выявляются в результатах регистрации ЭМИ (см. рис.20 а, б), хотя географическое положение зон повышенного уровня ЭМИ получается одним и тем же, соответствующим положению неоднородностей в ледяном покрове (см.рис. 20 в).

Граница пресноводного и морских льдов в устье р.Печора выявляется как концентратор (рис.21) в силу существенного различия физико-механических свойств этих льдов. Действительно, как известно, прочность морского льда значительно уступает прочности пресноводного. В результате таких различий пластические деформации с формированием микротрещин в морском льду происходят при меньших значениях механических напряжений. Как правило, различна также и толщина этих видов льдов (в приводимых примерах данные о толщине отсутствуют). Совокупность указанных факторов приводит к тому, что при общем изгибе припая как ледяной пластины в зоне стыка льдов происходит как бы усиленный изгиб по аналогии с изгибом пластины, зажатой одним из своих концов. При этом излучение формируется преимущественно в морском льду из-за его более низкой механической прочности и соответственно — пониженного предела длительной ползучести.

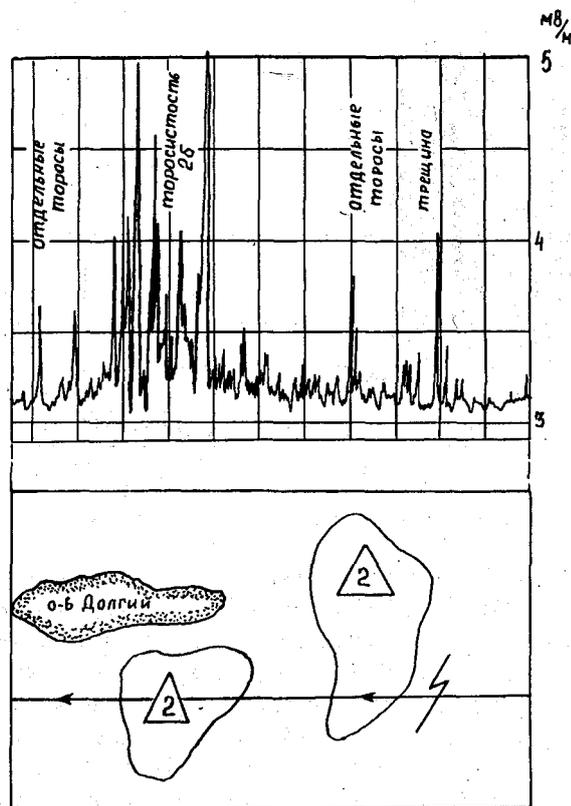


Рис. 22. Пример регистрации сжатий в зоне торосов

Аналогичную роль при концентрации изгибных механических напряжений играют поля и пояса торосов. Их средняя толщина значительно больше, чем у окружающих льдов. В результате здесь также формируется эффект зажатой с одного конца пластины. Но дополнительно сами зоны торосов тоже не являются однородными и в них наблюдается усиление деформаций на стыках между отдельными торосами. Поэтому повышенные значения уровня ЭМИ регистрируются не только на границах зон, но и непосредственно над самими зонами (рис. 22).

Над границами льдов различных возрастных категорий наблюдается картина, аналогичная границам пресноводного и морского льдов. Различный возраст льдов обуславливает их различную прочность и различие толшины. В силу этого здесь также происходит концентрация механических напряжений, что и проявляется в возрастании уровня ЭМИ (рис. 23).

Сильное возрастание напряженности ЭМИ характерно также для застамушенных мелководных участков. Здесь концентрация механических напряжений особенно велика, поскольку припайный лед скреплен с обра-

зованиями, плотно “сидящими” на грунте. При этом возбуждение ЭМИ может обеспечиваться не только за счет изгибных нагрузок, но также и при продольных нагрузках.

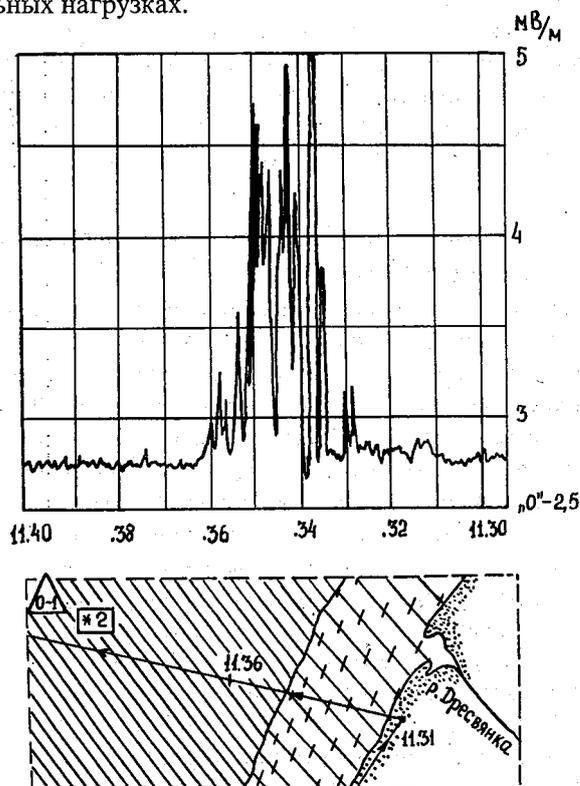


Рис. 23. Пример регистрации сжатий на границе льдов различных возрастных категорий

Представляет интерес сравнение результатов регистрации над застывшим районом при разных гидрометеословиях 21 апреля и 16 апреля (см. рис. 20). При северном ветре 16 апреля наблюдался пониженный средний уровень деформационных процессов на акватории губы, однако это сравнительно мало сказалось на значениях напряженности ЭМИ, которая в обеих ситуациях (см. рис. 20 *a, б*) составляла примерно 4,5 мВ/м (различия в длине участка с повышенной напряженностью обусловлены различиями маршрутов).

В то же время уровни и “длины” сигналов над границами льдов различных возрастных категорий существенно различаются. Подобные различия, будучи подтвержденными статистически достоверно, очевидно, позволят рассчитывать на создание специальных методов идентификации различных ледовых образований в приае при проведении съемок “всле-

пую”, т.е. без сопутствующей ледовой разведки либо при невозможности ее выполнения (условия полярной ночи, низкой облачности, тумана).

Отдельно следует отметить такую неоднородность сплошного ледяного покрова, как магистральные трещины. Их выявление в припае является чрезвычайно важной задачей. Формирование сигналов ЭМИ магистральными трещинами при деформационных процессах в припае является весьма специфичным и это позволяет выделять трещины на фоне остальных неоднородностей и картировать их географическое расположение.

2.2.6. Методы выявления и картирования магистральных трещин в сжатых припайных льдах

В настоящее время отдельные магистральные трещины или эшелоны трещин в припайном ледяном покрове при ледовой авиаразведке выявляются по единственному дешифровочному признаку — выторашиванию снега на поверхность по линии расположения трещины [8]. Определения производятся визуально, таким образом, информация может быть получена только при наличии видимости. Кроме того, выявление трещин становится затруднительным после метелей и снегопадов.

Между тем объективная информация о наличии трещин и их расположении приобретает все более важное значение, особенно в связи с выгрузкой транспортных судов через припай на необорудованный берег. Необходимость учета действующих трещин в окрестностях района выгрузки непосредственно следует из требований обеспечения безопасности работ, в частности, на грузовой автомагистрали [8]. Также весьма важна информация о трещинах при прогнозе основных линий взлома припая в весенне-летний период, особенно в зонах функционирования разведочных буровых установок на шельфе.

Очень важное значение имеет оперативное картирование трещин при проводке караванов судов через районы припайного льда. При отсутствии сжатий (нажимного ветра) энергетически более выгодно движение каравана вдоль трещин как линий естественных разломов, тем более что их генеральное расположение обычно приближенно повторяет береговую черту. Однако ситуация сразу же изменяется при наличии сжатий. Являясь концентраторами механических напряжений, трещины могут существенно ограничивать скорость движения каравана, а также создавать опасность заклинивания судов. Это обуславливает необходимость пересечения трещин в таких ситуациях по нормали к их направлению простираения.

Все сказанное предполагает высокую актуальность внедрения принципиально новых инструментальных методов выявления и картирования трещин при авиаразведке, способных обеспечить сбор информации вне зависимости от гидрометеорологических условий и такого ненормируемого фактора, как способность наблюдателей к визуальному дешифрированию

признаков. Эти новые методы основаны на некоторых особенностях физических процессов, происходящих при сжатиях в области трещин [1].

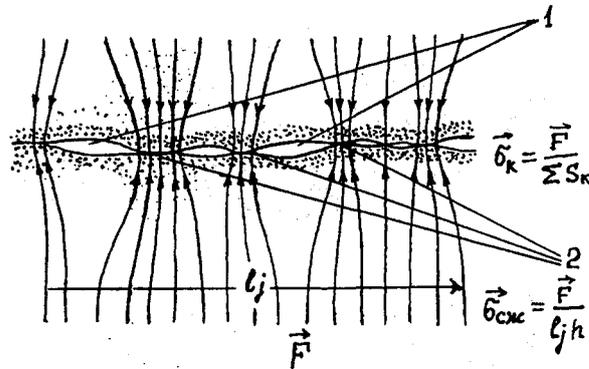


Рис. 24. Схема концентрации напряжений в области магистральной трещины

Реальную магистральную трещину представим следующим образом. Выделим в каждой трещине (рис. 24) зоны разрыва 1, например в виде узких эллиптических отверстий, имеющих конечные размеры и расположенных случайным образом, а также зоны контакта 2. В однородном поле напряжений $\sigma_{сж}$ такая структура приводит к тому, что фактические напряжения в окрестностях зон контакта σ_k существенно превышают $\sigma_{сж}$. Таким образом, вдоль линии простираения трещины возникает цепочка локальных концентраторов, приводящих к искажениям однородности поля напряжений по обе стороны от трещины.

Величину концентрации напряжений приближенно можно оценить по выражению

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_k}{\sigma_{сж}} \cong \frac{l_i h}{\sum_1^k S_{ki}}, \quad (39)$$

где l_i — длина трещины на некотором i -ом участке; h — толщина льда; $\sum_1^k S_{ki}$ — суммарная площадь зон контакта на выбранном участке.

Очевидно, что у несмерзшихся трещин значение k_{σ} в условиях сжатий всегда больше единицы.

Вследствие неоднородности поля в окрестностях магистральной трещины может возникать сеть более мелких трещин, которые, в свою очередь, являясь концентраторами, усиливают создавшуюся неоднородность. На участках, где напряжения из-за концентрации превышают предел длительной ползучести ($\sigma_k > \sigma_{\infty}$), в соответствии с ранее рассмотренными закономерностями формируются повышенные уровни ЭМИ. Наличие электропроводной подложки под излучающим слоем способствует направленности потока энергии излучения по вертикали. Таким образом, можно счи-

тать, что магистральные трещины в припае в условиях сжатий являются квазилинейными источниками ЭМИ.

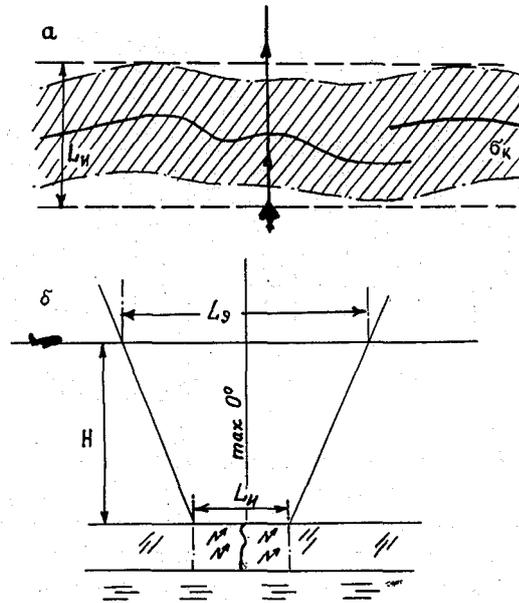


Рис.25. Схема представления трещины как квазилинейного излучателя ЭМИ

Ширина L_u такого квазилинейного источника в общем случае определяется изрезанностью трещины и размерами зоны концентрации (см. рис. 25 а). При осуществлении измерений с самолета разведки на высоте полета H целесообразно рассматривать некоторую эквивалентную ширину $L_s > L_u$, обусловленную дополнительно шириной диаграммы направленности излучателя (см. рис.25 б). Для распространенных типов трещин значение эквивалентной ширины по данным натуральных экспериментов не превышает 100—120 м.

При скорости полета самолета разведки порядка 150 км/ч пересечение такого участка по нормали к генеральному протиранию трещины происходит за время порядка 2—3 с. На непрерывной записи напряженности ЭМИ по маршруту в такой ситуации регистрируется импульсный сигнал той же длительности с амплитудным значением, превышающим средний уровень фона приблизительно в k_θ раз.

Выбор маршрута полета при исходном выявлении трещин обусловлен очевидным требованием пересекать зоны концентрации напряжений по нормали к их пространственному расположению — в противном случае импульсный сигнал над трещиной может оказаться “размазанным” и интерпретация будет неоднозначной.

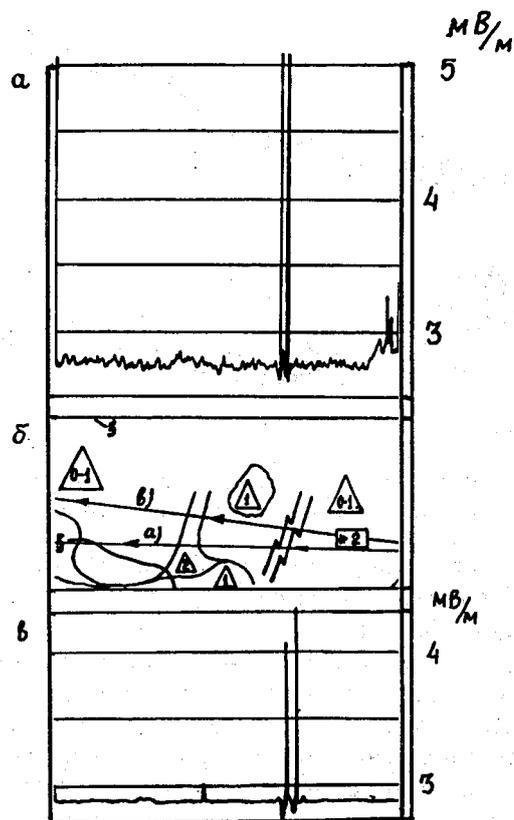


Рис. 26. Пример регистрации сигналов над магистральными трещинами

При отсутствии какой-либо априорной информации о расположении целесообразно воспользоваться тем фактом, что большинство типичных сквозных трещин в припае, в частности, приливные, изостатические и динамические, располагаются обычно в направлении, близком к направлению простираения береговой черты, что обусловлено физическими условиями их возникновения [8], поэтому маршрут полета в самом общем случае целесообразно устанавливать по нормали к береговой черте.

На рис. 26 а, в приведены характерные примеры записи на двух близко расположенных маршрутах, пересекавших зоны трещин. Участок карты ледовой обстановки в районе полетов приведен на рис 26 б. Две действующих трещины зарегистрированы в виде коротких импульсных всплесков напряженности, превышающих 4 мВ/м при среднем уровне в окрестностях менее 3 мВ/м и изменчивости среднего уровня порядка 0,2 мВ/м. Длительность зарегистрированных всплесков $1,5 \pm 2,0$ с.

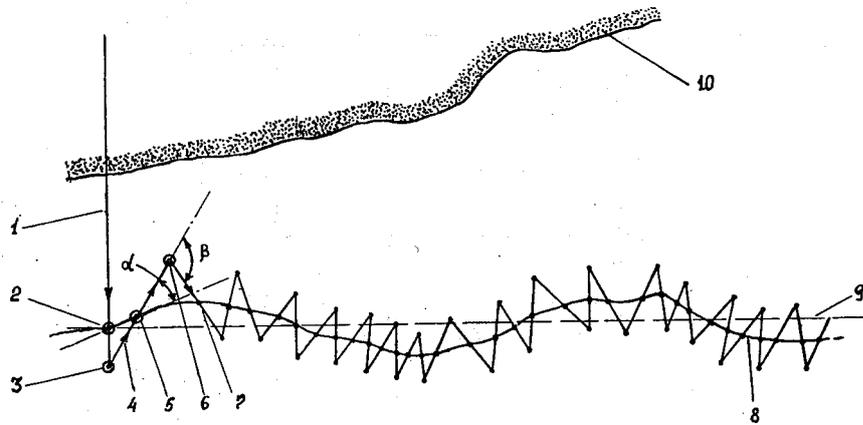


Рис. 27. Маршрут отслеживающего полета при картировании магистральной трещины

Картирование трещины, т.е. выявление ее пространственного расположения при слепых условиях разведки (в отсутствие видимости) выполняется следующим образом.

Регистрацию напряженности ЭМИ при картировании наиболее целесообразно производить с повышенной скоростью. Благодаря этому удастся детализировать характер излучения от трещины и получить “развернутый” импульсный сигнал. По данным на исходном галсе 1 маршрута (рис. 27) устанавливают максимум напряженности ЭМИ и определяют географическое положение точки 2, над которой зарегистрирован этот максимум. Продолжают полет по галсу 1 до тех пор, пока не будет зарегистрирован спад напряженности ЭМИ до фонового значения, причем регистрацию фона выполняют на расстоянии, составляющем не менее половины расстояния от максимума до точки спада к уровню фона — такой запас обуславливает надежность выявления точки 2. Затем в точке 3 производят разворот на галс 4. Первый угол разворота задают близким 145° . На галсе 4 выявляют новый максимум напряженности в точке 5 и определяют ее географическое положение, затем продолжают полет по этому галсу до точки 6. Расстояние между точками 5 и 6 задают равным расстоянию между точками 3 и 5. Определяют значение угла α между линией, соединяющей точки 2 и 5, и линией галса 4. Производят в точке 6 разворот на последующий галс 7, задавая угол разворота β , близким к $40^\circ + 2\alpha$. Если угол β получается больше 145° , то поворот выполняют на 145° . Продолжая указанные операции, выполняют весь полет. Соединив кривой точки 2, 5 и т.д., где были зарегистрированы максимумы напряженности, получают линию, устанавливающую пространственное положение трещины 8. Причем ее генеральное направление 9 может быть произвольным по отношению к расположению береговой черты 10.

Выбор пути полета по маршруту производится с учетом двух основных условий, существенно противоречащих друг другу. С одной стороны, требуются минимальные затраты времени на разведку ввиду высокой его высокой стоимости. С другой стороны, при осуществлении регистрации нельзя потерять трещину (естественно, рассматривается ситуация, когда визуальный контроль полностью отсутствует).

Если бы ставилось только одно условие — не потерять трещину, то полет можно было бы выполнять по сетке прямоугольных галсов, длинные участки которой располагались бы по нормали к генеральному направлению трещины 9. Но это потребовало бы существенного увеличения времени на разведку.

С другой стороны, минимум затрат времени был бы обеспечен, если полет производить непосредственно по линии 8. Однако это осуществить невозможно по следующим причинам. Во-первых, уменьшение регистрируемого сигнала напряженности по сравнению с максимумом еще не означает, что авиасредство отклонилось от линии 8, ведь над различными участками трещины интенсивность сигнала может быть различной ввиду различий в концентрации напряжений. Во-вторых, если отклонение все же выявлено (например, сигнал упал почти до фонового уровня), то остается неизвестным, по какую сторону от трещины в это время оказался наблюдатель.

Рассмотренные причины требуют выбора некоторого оптимального маршрута. Такой оптимальностью обладает маршрут в виде описанных пилообразных галсов. Требование производить развороты в точках, равноотстоящих от зарегистрированных точек максимума напряженности предопределяет ограничение отклонений маршрута от линии трещины 8, а требования к углам разворота в каждой точке не позволяют потерять трещину.

Пример развернутой регистрации импульсного сигнала над трещиной на одном из галсов подобного маршрута представлен на рис. 28. Полет выполнялся в направлении от точки 1 к точке 4. Изменчивость напряженности ЭМИ 5 имеет здесь колоколообразный вид. Полная ширина сигнала 6 превышает ширину зоны концентрации напряжений 3 в области трещины — что обусловлено влиянием наклона линии маршрута относительно трещины, а также шириной диаграммы направленности зоны трещины как квазилинейного источника ЭМИ. Точкой 2 пересечения трещины на приведенных данных является точка максимума зарегистрированного сигнала 5.

Несомненно, что развертка во времени импульсного сигнала над трещиной не является в этом методе строго обязательным условием. Регистрация на каждом галсе может производиться и по характерному импульсу, в частности, при использовании самолета для выполнения разведки. В этом случае будут существенно удлиняться также сами галсы, поскольку осуществлять частые развороты для самолета технологически сложно. Так что развертка наиболее целесообразна при вертолетной разведке, в частности, для уже отмечавшихся задач проектирования зоны выгрузки транс-

портных судов через припай на необорудованный берег, либо при проводке каравана по припаю, когда требуется детальное картирование трещины. При этом “развертка” дает также дополнительную информацию о дальнейшем направлении простираения трещины.

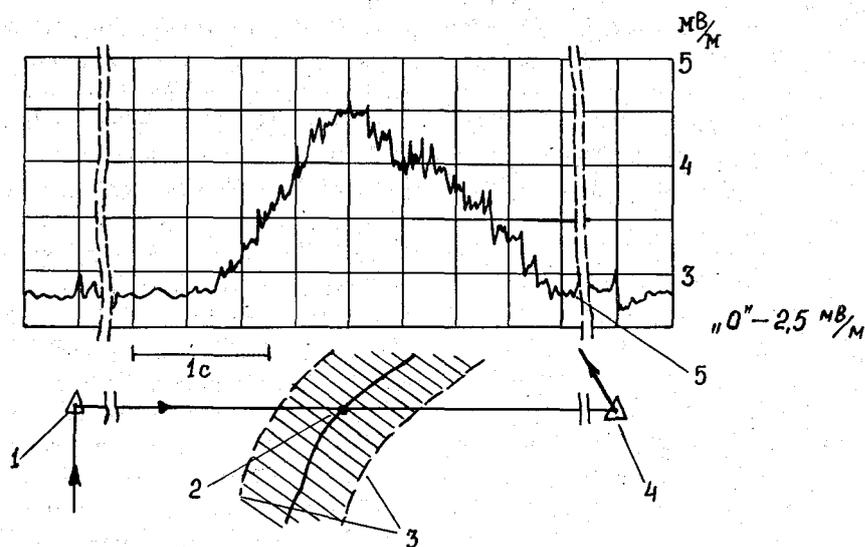


Рис.28. Развернутая запись импульса ЭМИ при пересечении магистральной трещины

Например, повышенный уровень сигнала в правой части кривой 5 (см. рис. 25) свидетельствовал бы о том, что трещина после точки 2 поворачивает вправо. Обратная асимметрия свидетельствовала бы о противоположном повороте. Некоторая неоднозначность связана лишь с тем, что, как уже отмечалось, абсолютная величина напряженности ЭМИ на разных участках трещины может быть различной, что также приводит к асимметрии сигнала.

Если бы трещина не изменяла своего направления, то наиболее выгодным был бы такой полет, чтобы половинки галсов образовывали с линией трещины равнобедренный треугольник с вершиной в точке разворота. Это обеспечило бы минимум затрат времени на разведку. Тогда угол разворота был бы 2α , где α — угол при основании треугольника. Однако трещина может изменить направление на некоторый угол φ . Эта ситуация рассмотрена на рис. 29. Здесь линия MO показывает зарегистрированное положение участка трещины; линия $NOAB$ — направление текущего галса; точка O — зарегистрированная точка максимума напряженности; точка A — требуемая точка разворота.

Очевидно, наихудшим вариантом является изменение направления простираения трещины в точке O . Трещина может отклониться либо влево

(по лучу OC), либо вправо (по лучу OE). Из схемы видно, что во втором случае (OE) при угле разворота, равном 2α , трещина окажется потерянной — полет пойдет по галсу AD , примерно параллельному галсу OE . Чтобы такого не случилось, угол разворота следует задавать превышающим 2α , причем на величину, не меньшую максимально возможного значения φ . Это обеспечит гарантированную регистрацию трещины на галсе AF при любом изменении ее направления в пределах сектора COE .

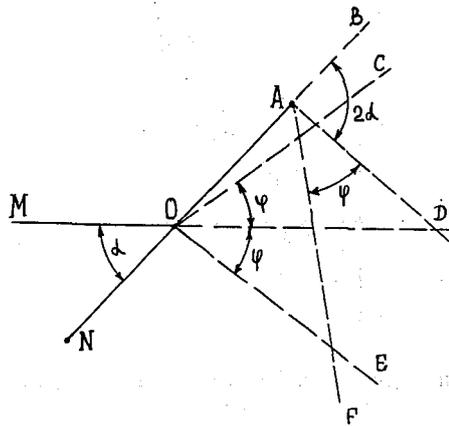


Рис. 29. Выбор галсов маршрута при картировании трещины

Максимально возможное значение φ определяется из физических условий, которые обеспечивают формирование трещины в ледяном поле. Дело в том, что рост трещины не является каким-либо совершенно случайным процессом, а обуславливается целым рядом физических закономерностей. Представим, что формирование трещины шло по линии MO . Как известно, трещина в твердом теле распространяется в направлении максимальных растягивающих напряжений. В момент времени, когда трещина дошла до точки O , в окрестностях ее устья значения напряжений в полярной системе координат будут следующими [31, 56, 57, 60, 62, 65]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{K_I}{2\sqrt{R}}(3 - \cos\varphi)\cos\frac{\varphi}{2}; \\ \sigma_\theta &= \frac{K_I}{2\sqrt{R}}(1 + \cos\varphi)\cos\frac{\varphi}{2};\end{aligned}\quad (40)$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжений; R — расстояние от вершины трещины; φ — угол, отсчитываемый от исходного направления трещины; σ_r — радиальная составляющая напряжений; σ_θ — касательная составляющая напряжений.

Для нашей задачи представляет интерес соотношение между проекциями σ_r и σ_θ на нормаль к линии OD (см. рис. 29):

$$\frac{(\sigma_{\theta})_h}{(\sigma_r)_h} = \frac{(1 + \cos\varphi)\cos\varphi}{(3 - \cos\varphi)\sin\varphi} \quad (41)$$

при $\varphi \neq 0$.

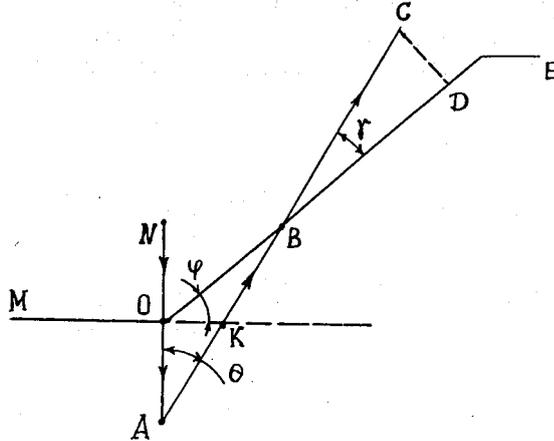


Рис. 30. Предельный случай выбора галса при картировании трещины

Внутри сектора COE это соотношение больше единицы (преобладает напряжение растяжения), на границах сектора равно 1, а снаружи сектора меньше 1 (преобладает напряжение сжатия). Исходя из этого, найдем максимальное значение φ_{\max} из условия

$$\frac{1 + \cos\varphi_{\max}}{3 - \cos\varphi_{\max}} \operatorname{ctg} \varphi_{\max} = 1. \quad (42)$$

Получим $\varphi_{\max} = 37,2^\circ \approx 40^\circ$. Вот именно в соответствии с этим результатом целесообразно задавать условие величины угла разворота — $(40^\circ + 2\alpha)$. Однако, если пользоваться этим условием без каких-либо ограничений, то может возникнуть ситуация разворота на 180° и более, что явно недопустимо.

Действительно, рассмотрим предельную ситуацию такого типа, показанную на рис. 30. Полет происходит по галсу NOA , в точке A делается разворот. Трещина проходит по линии $MOBDE$.

Величина угла α здесь равна 90° , а угол разворота в точке A в соответствии с условием должен быть равен 220° . Это недопустимо и необходимо ограничение угла разворота некоторой величиной $180^\circ - \theta$.

Выявим оптимальное значение θ .

Во-первых, θ должно быть меньше φ_{\max} . Ведь если $\theta \approx \varphi_{\max}$, то линии AC и OD не пересекутся. Разница между θ и φ_{\max} должна быть такой, чтобы в точке C при $|BC| = |AB|$ сигнал напряженности ЭМИ был близок к

фоновому, только в таком случае будет уверенно интерпретироваться положение максимума в точке B . Поскольку на участке OA такая регистрация уже была выполнена с коэффициентом запаса 1,5, то установим, что $|CD| \approx 2/3 |OA|$. В этом случае

$$|BC| \sin \gamma \approx \frac{1}{3} |AB| \cos \theta. \quad (43)$$

Как следует из геометрических соображений

$$\gamma + \theta = 90^\circ - \varphi_{\max}. \quad (44)$$

С использованием этих условий получаем предельное значение угла разворота — $(180^\circ - \theta \cong 145^\circ)$. Таким образом, с использованием установленных условий отслеживаемая трещина в отсутствие визуального контроля не окажется потерянной. Одновременно затраты времени на разведку являются минимальными.

Дополнительно следует отметить, что в силу общности используемых физических принципов рассмотренный метод после соответствующей технической доработки, по-видимому, может быть использован для картирования скрытых трещин в припае, а также для картирования трещин в дрейфующих ледяных полях, находящихся в условиях сжатий. Детальное картирование таких трещин, в принципе, позволит выбирать оптимальные маршруты движения караванов судов.

ГЛАВА 3. КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОМ ЛЬДУ

3.1. ПРЯМЫЕ КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ

3.1.1. Принципы измерений

Все контактные методы измерения характеристик динамических процессов во льду сводятся к получению непрерывных во времени реализаций, описывающих изменение деформаций во льду или перемещение элементов льдины или льдины в целом. Путем использования нескольких измерителей можно определять основные компоненты деформаций и напряжений, возникающих как при динамических, так и при квазистатических нагрузках.

Механические напряжения определяют интенсивность внутренних сил, деформации — упругое перемещение под действием этих сил. Зависимости между напряжениями в точке определяются типом напряженного состояния: линейным, плоским и объемным. Для объемного сжатия линейно деформируемого изотропного тела принимаются следующие зависимости между нормальными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и соответствующими им относительными деформациями $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 E &= \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3); \\ \epsilon_2 E &= \sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3); \\ \epsilon_3 E &= \sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2),\end{aligned}\tag{45}$$

где E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона.

При линейном (одноосном) напряженном состоянии два главных напряжения равны нулю ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$); при плоском (двухосном) одно из трех главных напряжений равно нулю ($\sigma_3 = 0$); при объемном (трехосном) — все три главных напряжения отличны от нуля: $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. Аналитические зависимости между напряжениями в данной точке определяются типом напряженного состояния и приводятся в соответствующих разделах работ по теории упругости.

Под действием внутренних и внешних сил в ненарушенном ледяном покрове может реализовываться плоское напряженное состояние, так как вертикальные компоненты напряжений малы по сравнению с горизонтальными, и деформации предполагаются однородными по толщине льда:

$$\begin{aligned}\sigma_{1,2} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}; \\ \operatorname{tg} 2\theta &= -\frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)},\end{aligned}\quad (46)$$

где σ_x, σ_y — нормальные компоненты тензора напряжений; τ_{xy} — касательные напряжения; θ — главное направление.

При изучении напряженного состояния ледяного покрова возникают сложности, вызванные анизотропией ледяной пластины, наличием трещин, различием физико-механических свойств льда, зависимостью упругих характеристик льда от напряжений, а также другими переменными характеристиками, не поддающимися точной аналитической оценке. В связи с этим применение теории упругости к задачам изучения напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при воздействии сил гидрометеорологического характера ограничивается только частными случаями, действительными для конкретных ледовых условий.

Для определения главных напряжений измерительные преобразователи (ИП) напряжений устанавливаются по схемам с углами 90 и 120° относительно осей чувствительности ИП. Для случая расстановки ИП под углами 120° для главных напряжений имеем

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B + \sigma_C) \pm \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_A - \sigma_B)^2 + (\sigma_B - \sigma_C)^2 + (\sigma_A - \sigma_C)^2]}.\quad (47)$$

Угол между максимальным напряжением и преобразователем составит:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{3} \frac{\sigma_B - \sigma_C}{2\sigma_A - \sigma_B - \sigma_C}.\quad (48)$$

Для случая расстановки преобразователей под углом 90° для главных напряжений $\sigma_{1,2}$ имеем

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \mu\sigma_B}{1 - \mu_2}; \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_B + \mu\sigma_A}{1 - \mu_2}\quad (49)$$

при условии, что σ_1 совпадает с σ_A .

Для определения главных (максимальных и минимальных) деформаций ИП деформаций устанавливаются по схемам прямоугольных и равноугольных (под 120°) розеток.

Для случая расстановки приборов под углом 120° имеем

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3(1 - \mu)} \pm \frac{1}{1 + \mu} \left[\left(\varepsilon_A - \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_C}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.\quad (50)$$

Угол между максимальной деформацией и преобразователем составит

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_C}{\sqrt{3}}}{\varepsilon_A - \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3}} \right). \quad (51)$$

Для случая расстановки преобразователей под 90° имеем

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_A + \mu\varepsilon_B}{1 - \mu^2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_B + \mu\varepsilon_A}{1 - \mu^2}. \quad (52)$$

Используются ИП деформаций, установленные под углом 120° друг к другу, для определения главных деформаций в ледяном поле. В этом случае главные деформации составят:

$$\begin{cases} \varepsilon_{max} \\ \varepsilon_{min} \end{cases} = \frac{1}{3}(\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C) \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + (\varepsilon_B - \varepsilon_C)^2 + (\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2};$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_A - \varepsilon_B)}{2\varepsilon_A - (\varepsilon_B - \varepsilon_C)}, \quad (53)$$

где $\varepsilon_{(A,B,C)}$ — относительные деформации, измеренные деформометрами A , B , C ; α — главное направление.

Изменчивость главных деформаций и направлений дает представление о механизме подвижек во льду и их направленности в предположении двухмерности напряженного состояния ледяного покрова.

Уравнение, описывающее вертикальные смещения z любой точки прогрессивной волны в ледяном покрове, составит

$$z = z_0 \sin kX, \quad (54)$$

где z_0 — амплитуда волны; k — волновое число; $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны; X — расстояние. Отсюда для наклона φ льда по профилю волны имеем

$$\varphi = \frac{dz}{dx} = z_0 k \cos kX$$

и для амплитуды волны

$$z_0 = \frac{\varphi_0 \lambda}{2\pi}, \quad (55)$$

где φ_0 — амплитуда наклона льда в волне.

По известному значению амплитуды волны можно рассчитать деформации и напряжения сжатия-растяжения в верхнем слое льда.

Рассмотрим длинную балку единичной ширины в ледяном покрове. Под действием изгибно-гравитационных сил балка изгибается, при этом изгибающий момент будет

$$M = EI \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{d^2 z}{dx^2}, \quad (56)$$

где член $(1 - \mu^2)$ учитывает сжатие, обусловленное относительной поперечной деформацией в ледяной пластине. Отсюда напряжение σ_{xx} будет

$$\sigma_{xx} = \frac{M}{S} = -\frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{d^2 z}{dx^2}, \quad (57)$$

где S — площадь сечения; $S = h^2/6$.

Так как

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = -z_0 k^2 \sin kX,$$

то

$$\sigma_{xx} = \frac{Ehzk^2}{2(1-\mu^2)} \sin kX.$$

Через амплитуду наклона льдины φ_0 имеем

$$\sigma_{xx} = \frac{\pi h E \varphi_0}{\lambda(1-\mu^2)} \sin kX. \quad (58)$$

Сочетание трехкомпонентных ИП деформаций A, B, C под углом 120° с расстановкой их по треугольнику позволяет определять все параметры волнового процесса.

В модельных экспериментах по изучению физики волн используются различные схемы расстановок измерительных преобразователей на льду. Линейные расстановки с интервалом между ИП от 2 до 500 м позволяют определять скорости распространения упругих (продольных, поперечных, изгибных) и гравитационных волн в широком частотном диапазоне.

В экспериментах с заранее известным расположением источника волн (например, от взрыва, удара, ледокола) фазовая скорость C определяется по коррелируемым фазам групп волн из простого соотношения $C = X/\tau$, где X — расстояние, пройденное волной по линии расположения ИП, τ — время прохождения волной пути X .

При изучении физико-механических процессов образования волн естественного происхождения, когда неизвестно расположение источника волн, используются различные расстановки преобразователей по треугольнику со сторонами от 20 м до 5 км.

Нерегулярный характер волновых процессов в ледяном покрове, выражающийся, в частности, в том, что ординаты перемещений (наклонов, деформаций) изменяются с течением времени случайным образом, дает все основания отнести волны во льдах к числу случайных процессов, описываемых случайной функцией времени.

В зависимости от целей и необходимой точности делаются определенные выборки, т.е. используются конечные временные ряды наблюдений. С увеличением длины ряда статистические характеристики случайной величины, например, амплитуда наклона φ_0 в волне, стабилизируются и приближаются к ее характеристикам в генеральной совокупности. В то же время следует учитывать, чтобы временной ряд не был очень большим, так как для получения достоверных статистических характеристик квазистационарного процесса (например, при колебаниях льда от порывов ветра, при торошении) необходимо учитывать изменчивость внешних условий. Это хорошо выполняется при длине ряда 5—10 мин для периодов 5—15 с, при 10—20 мин для штормовой зыби с периодами 15—30 с и от получаса до нескольких часов для колебаний с периодами несколько минут.

Ход интенсивности волн сравнительно узкополосных диапазонов периодов (5—15 с, 15—30 с, 3—30 мин) можно характеризовать дисперсией σ^2 или среднеквадратическим отклонением σ амплитуд волнового процесса. Эти характеристики являются интегральными и, следовательно, более устойчивыми статистическими характеристиками распределения случайной величины, чем просто амплитуда волны. Среднеквадратическое отклонение более удобно, чем дисперсия, так как его размерность совпадает с размерностью измеряемой величины. Например, если значение амплитуды наклона льда получается в микрорадианах, то и среднеквадратическое отклонение также будет в микрорадианах.

Итак, рассматривая гравитационные волны в морских льдах как стационарный случайный гауссов процесс, ординаты которого имеют нулевое математическое ожидание, можно для расчета использовать формулы

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}},$$

где n — число измерений на выборочном временном интервале; a_i — средняя амплитуда волны за 5 мин.; \bar{a} — средняя арифметическая амплитуда волны за 1 ч; σ — среднеквадратическая амплитуда волн за 1 ч.

Таким образом, за сутки определяется 24 значения σ , характеризующие отклонение (рассеяние) амплитуд волн как фонового уровня, так и события. При нормальном законе распределения амплитуд вероятность того, что значение отдельного измерения в серии не превзойдет вычисленное среднеквадратическое отклонение, составляет 68 %.

Минимальные среднеквадратические колебания фоновых уровней составляли 0,1 мкрад (например, на ледяном острове дрейфующей станции «Северный полюс-22»); при интенсивных волнах зыби наклон достигает нескольких миллирадиан (например, на кромке льдов Баренцева моря).

Спектральная обработка данных заключается в определении спектров S_{xx} и S_{xy} парных синхронных реализаций x и y , взаимных спектров

$$S_{xy} = S_{xy} + iS_{xy}''$$

где S_{xy} и S_{xy}'' — синфазная и квадратурная составляющие взаимной спектральной плотности, функции взаимной когерентности

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|S_{xy}|^2}{|S_{xx}| |S_{yy}|} \quad (59)$$

и функции разности фаз

$$\Delta\varphi_{xy} = \arctg \left(\frac{S_{xy}''}{S_{xy}} \right).$$

Положительное значение $\Delta\varphi$ соответствует запаздыванию Y относительно X на частоте f и наоборот. Отсюда сдвиг τ по времени на периоде волны T

$$\tau = \frac{\Delta\varphi_{xy}(f)T}{360}, \text{ с.} \quad (60)$$

С помощью разработанных к настоящему времени методов измерений и измерительных средств можно определять характеристики почти всех физико-механических процессов в ледяном покрове. Безусловно, что методы будут совершенствоваться, особенно в части, касающейся измерения плоского напряженного состояния льда, исключаяющего изгибные деформации и напряжения. Здесь, по-видимому, большое будущее за многоточечными измерениями главных деформаций и напряжений в масштабах до 100 км и более с помощью ледовых буев, передающих информацию через спутник. Такие наблюдения особенно перспективны при использовании комплексных измерительных средств.

3.1.2. Чувствительные элементы, применяемые при измерениях

Динамический диапазон измеряемых характеристик достаточно велик (амплитуды колебаний могут быть от долей микрона до 1 м), поэтому измерения могут производиться разными по принципу действия первичными преобразователями. Технические сложности измерения с их помощью также различны. Измерения средних величин компонент упругих колебаний в диапазоне низких частот (до 0,1 Гц) можно отнести к стандартным сейсмометрическим наблюдениям: волны под ледяным покровом

в диапазоне периодов 5—50 с также достаточно просто измеряются мареографами с повышенной чувствительностью.

В то же время для регистрации других характеристик требуются более сложные приборы. Так, достаточно трудно измерять механические напряжения во льду и особенно изучать напряженно-деформированное состояние ледяного покрова. Преодолеваются разного рода методические трудности измерения волн с амплитудами несколько миллиметров и длиной волны до 1 км и более.

Рассмотрим конструкцию чувствительных элементов для исследования физико-механических процессов во льду.

Применение разных по принципу действия измерительных преобразователей для исследования одного и того же физико-механического процесса позволяет с минимальной погрешностью определять его характеристики, выявлять связи с другими процессами и явлениями. Для натурных исследований используются приборы, которые получили в литературе названия: маятниковые наклономеры (сеймонаклономеры), штанговые деформометры, измерители давления (напряжения) во льду, сейсмометры, акселерометры, мареографы. Измерение деформаций льда, напряжений во льду и наклонов ледяного покрова связаны с измерением перемещений. Но непосредственные перемещения льда измерять с помощью тех либо иных известных типов преобразователей деформаций либо перемещений (см. раздел 3.2) невозможно — необходимы некоторые промежуточные конструктивные элементы, которые непосредственно контактируют со льдом (например, вмораживаются в лед) и уже с этими элементами контактируют собственно преобразователи. Подобные промежуточные элементы, которые являются средствами измерений (ГОСТ 16263—70), поскольку требуют нормирования метрологических свойств, в измерительной технике принято называть чувствительными элементами (ЧЭ).

В устройствах для измерений наклонов в качестве чувствительного элемента применяют горизонтальный маятник 1 (рис.31), подвешенный на одной вертикальной и двух горизонтальных металлических струнах 3 [73]. В качестве инертной массы используется кольцевой магнит 2 с магнитопроводом. Для обеспечения необходимого затухания колебаний маятника ЧЭ содержит медный цилиндр 4, который входит в зазор магнита и магнитопровода. Внутри ЧЭ размещен преобразователь перемещений 5. Метрологические свойства этих ЧЭ определяются на специальной платформе, с помощью которой задаются как статические наклоны основания ЧЭ, так и колебания с частотой до 1 Гц. Типичные характеристик ЧЭ следующие:

- собственный период маятника 2 с;
- затухание апериодическое;
- измеряемый диапазон наклонов $(0,1—10^3)$ мкрад;
- измеряемый диапазон ускорений $(10^{-6}—10^{-2})$ м/с².

При определенных условиях работы рассмотренных ЧЭ горизонтальные ускорения льдины можно определять по формуле $\ddot{x} = g \sin \varphi$, где g —

постоянная силы тяжести, φ — угол наклона. При малых углах φ ускорение будет $\dot{x} = g\varphi$. Подобные условия возникают в том случае, когда сейсмонаклономер регистрирует резкие сдвиги, удары льдины и т.п.

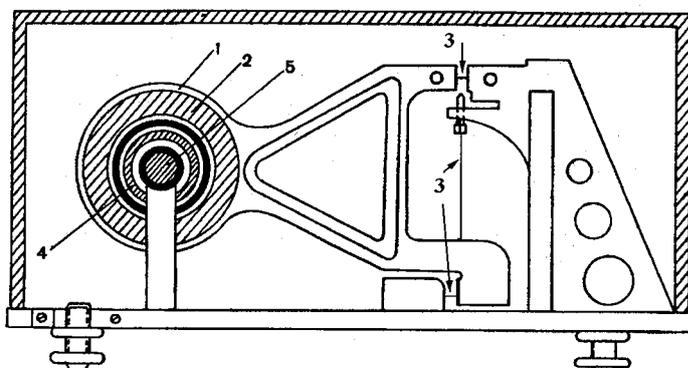


Рис. 31. Схема конструкции чувствительного элемента измерителя наклонов

В устройствах для измерения *деформаций* необходимо определять перемещения одной точки сплошного слоя льда относительно другой. В Полярном институте Скотта разработаны устройства для измерения деформаций на основе инварной проволоки, непосредственно связываемой со льдом; в этом варианте проволока одновременно является чувствительным элементом и преобразователем деформаций (см. раздел 3.2); устройства хорошо зарекомендовали себя при изучении морских льдов, в том числе в российских экспедициях в Арктику и Антарктику [76, 91].

В штанговых деформометрах, используемых в ААНИИ [70] использованы чувствительные элементы, представляющие собой кварцевую трубу 1 (рис.32 а), систему креплений, устройства для вмораживания в лед — постамент 2 и стойку 3, температурный компенсатор 4 и преобразователь механических перемещений в электрический сигнал 5. Стабильность работы ЧЭ и сведение к минимуму влияния температуры обеспечиваются применением материалов с низким коэффициентом температурного расширения. Погрешность измерения деформаций не хуже 6 % для кратковременных процессов.

Для долговременных измерений из-за отсутствия критерия их объективности погрешность определялась на основании дублирования работы двумя деформометрами в течение длительного времени. Максимальное расхождение не превышало 20 %. Для штанговых деформометров, где применялись описанные ЧЭ, характерны следующие основные технические данные:

— диапазон измерений $10^{-7}—5 \cdot 10^{-3}$;

- основная погрешность канала деформометра 5 %;
- база ЧЭ 2 м;
- коэффициент температурного расширения кварцевого стекла $5 \cdot 10^{-7} (\text{°C})^{-1}$
(т.е. температурный дрейф эквивалентен $0,5 \cdot 10^{-6}$ на 1°C).

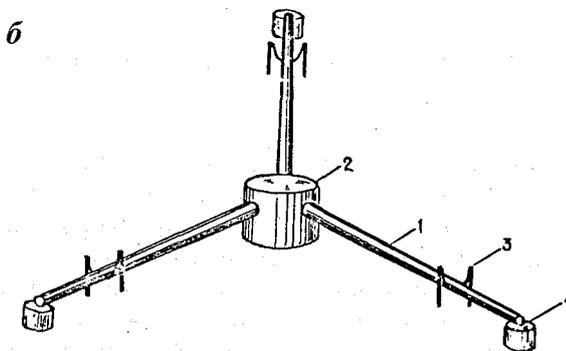
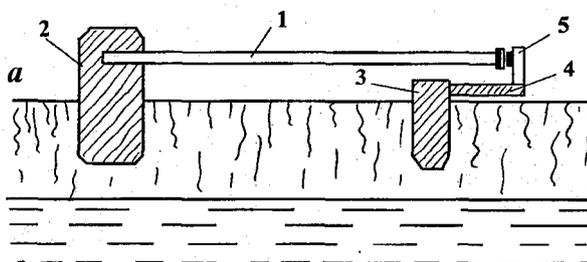


Рис.32. Схемы конструкций ЧЭ штанговых деформометров

Для векторных измерений деформаций во льду рассмотренные ЧЭ 1 располагаются под углом 120° (см. рис. 32 б) и посредством стоек 2 и 4 крепятся во льду. Из-за своей большой длины кварцевые штанги 1 установлены на дополнительных подставках 3.

В устройствах для прямых измерений *механических напряжений (давлений)* применяются чувствительные элементы мягкого и жесткого типа.

За рубежом в качестве чувствительных элементов использовались упругий цилиндр, плоский диск и др. Совершенствование конструкции ЧЭ, по-видимому, будет еще продолжаться, так как имеются определенные трудности в интерпретации сигналов приборов. В России измерения напряжений во льду проводились с помощью преобразователей, чувствительными элементами которых были упругая мембрана, тонкостенная сфера. Подобные ЧЭ в морской практике часто применяются в преобразователях гидростатического давления. Их достоинства и недостатки подробно рассмотрены, например, в работе [79].

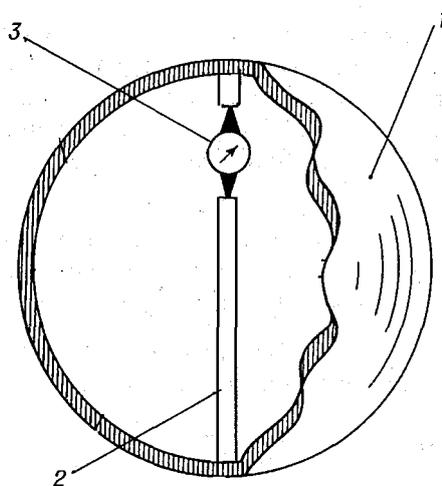


Рис.33. Схема сферического ЧЭ для прямых измерений механических напряжений (давлений)

Все чувствительные элементы имеют свои достоинства и недостатки. Поэтому, не отдавая предпочтения ни одному из них, приведем краткие сведения о широко используемом сферическом ЧЭ. Сферический ЧЭ выполнен в виде металлической сферы 1 диаметром 200 мм и толщиной стенок 6 мм (рис.33) [76]. Внутри сферы в крепежных стойках 2 установлены преобразователи перемещений 3, реагирующие на изменение диаметра сферы. Калибровка ЧЭ во льду производится с помощью специальных устройств. Преобразователь на основе таких ЧЭ, используемых в экспериментальных работах ААНИИ, имеет следующие основные технические данные:

- чувствительный элемент — полая металлическая сфера диаметром 0,2 м; толщина стенок 6 мм;
- диапазон измерений 10^{-3} — 3,0 МПа;
- диапазон изменения диаметра сферы 100 микрон.

К материалам, используемым в ЧЭ, предъявляются повышенные требования как к их механическим свойствам (отсутствие гистерезиса и т.д.), так и к термостабильности — низкий коэффициент линейного (или объемного) расширения.

3.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВО ЛЬДАХ

3.2.1. Резистивные преобразователи

Проволочные тензорезисторы. Принцип действия проволочных тензорезисторов основан на свойствах изменения сопротивления металличе-

ких проводников при их деформации. Если к линейному проводнику приложено некоторое усилие, то он деформируется как в продольном, так и в поперечном направлении. Продольная деформация $\epsilon_0 = \Delta l/l$ (относительное изменение длины) в области упругих деформаций связана с действующим механическим напряжением законом Гука

$$\epsilon_0 = \sigma/E, \quad (61)$$

где σ — действующее напряжение; E — модуль Юнга.

Поперечная деформация $\epsilon_{II} = \Delta D/D$ (относительное изменение диаметра) связана с ϵ_0 через коэффициент Пуассона μ

$$\epsilon_{II} = -\mu\epsilon_0. \quad (62)$$

Поскольку сопротивление провода R определяется выражением

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (63)$$

(ρ — удельное сопротивление, l — длина, S — площадь поперечного сечения), то при наличии деформации ϵ_0 и ϵ_{II} изменения сопротивления из-за воздействия напряжения σ могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{dR}{d\sigma} = \frac{\rho}{S} \frac{\partial l}{\partial \sigma} - \frac{\rho l}{S^2} \frac{\partial S}{\partial \sigma} + \frac{l}{S} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \quad (64)$$

или в относительном виде

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial \sigma} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}. \quad (65)$$

Если пренебречь изменениями удельного сопротивления, то чувствительность тензорезисторов k_σ к изменениям механического напряжения окажется равной

$$k_\sigma = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{E} (1 + 2\mu), \quad (66)$$

а чувствительность к продольной деформации

$$k_\epsilon = \frac{dR/R}{\partial l/l} = 1 + 2\mu. \quad (67)$$

Поскольку выходным параметром чувствительных элементов обычно является значение деформации, то для тензорезисторов, применяемых в измерительных преобразователях, как правило, указывается коэффициент тензочувствительности k_ϵ в виде (67). Так как значение μ для большинства металлов и сплавов находится в пределах $0,3 \div 0,5$, то k_ϵ составляет $1,6 \div 2,0$. Однако экспериментальные данные обычно дают более высокие значения, что приводит к выводу о достаточно существенном влиянии на тен-

зочувствительность изменений удельного сопротивления материала. Реальные значения k_ϵ составляют $2 \div 5$, причем для ряда металлов и сплавов k_ϵ является функцией деформации, что обуславливает нелинейность характеристики тензочувствительности. В связи с этим целесообразно применение в качестве тензометров лишь немногих сплавов, отличающихся постоянством k_ϵ (при постоянной температуре), например сплава типа <ферри> (55 % Cu, 45 % Ni) с $k_\epsilon \approx 2,2$, сплава <адванс> (58 % Cu, 42 % Ni) с $k_\epsilon \approx 2,1$ и некоторых других.

Важной характеристикой тензометров является их предел прочности на растяжение, который для указанных выше сплавов составляет примерно $4,6 \cdot 10^8$ Па. Оценивая значение модуля Юнга в $(1 \div 2) \cdot 10^{11}$ Па, получим предельно возможные значения деформаций тензометров $(2 \div 5) \cdot 10^{-3}$. Поскольку $k_\epsilon \approx 2$, то изменения сопротивления при предельных деформациях составляют не более $0,4 \div 1,0$ %, и для обеспечения статической погрешности измерения деформаций порядка ± 1 % оказывается необходимым обеспечивать измерения сопротивления с погрешностью не хуже $0,004 \div 0,01$ %, что, несомненно, представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

Одним из наиболее существенных факторов при решении такой задачи является температурная чувствительность тензометров. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) для сплавов типа <ферри>, <адванс>, константан оценивается как минимально возможный и составляет примерно $\pm 0,002$ % \cdot K⁻¹. При их эксплуатации в ледовых условиях, когда изменения температуры могут превышать 30 К, температурная погрешность измерения деформаций возрастает до $6 \div 15$ %, что может оказаться неприемлемым. В связи с этим одиночные тензорезисторы в измерениях, как правило, не используются. Для автоматической компенсации влияния температуры тензорезисторы объединяются в полумостовые либо четырехплечные мостовые схемы (рис. 34).

Полумостовая схема (см. рис. 34 а) содержит два идентичных тензорезистора $R_{\epsilon 1}$ и $R_{\epsilon 2}$, включенных как делитель напряжения питания E_n . Выходной сигнал схемы $U_{\text{вых}}$ составляет

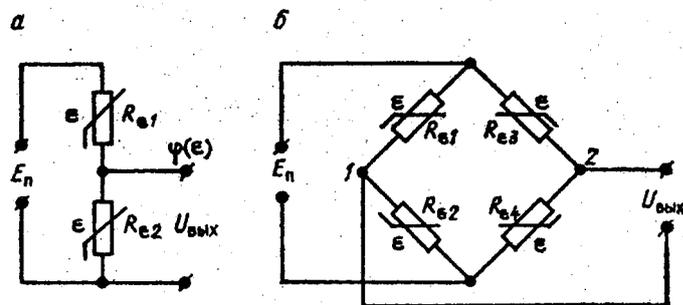


Рис.34. Варианты схем ИП с тензорезисторами

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{E_{\text{П}} R_{\epsilon_2}}{R_{\epsilon_1} + R_{\epsilon_2}}. \quad (68)$$

Если оба тензорезистора имеют одинаковые температурные коэффициенты, т. е.

$$\frac{1}{R_{\epsilon_1}} \frac{\partial R_{\epsilon_1}}{\partial T} = \frac{1}{R_{\epsilon_2}} \frac{\partial R_{\epsilon_2}}{\partial T}, \quad (69)$$

то результирующее влияние температуры на выходной сигнал

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial T} = \frac{E_{\text{П}} R_{\epsilon_1} R_{\epsilon_2}}{(R_{\epsilon_1} + R_{\epsilon_2})^2} \left(\frac{1}{R_{\epsilon_2}} \frac{\partial R_{\epsilon_2}}{\partial T} - \frac{1}{R_{\epsilon_1}} \frac{\partial R_{\epsilon_1}}{\partial T} \right) \quad (70)$$

оказывается равным нулю.

При неудачном подборе тензорезисторов, когда разность их ТКС составляет $\Delta_{\text{ТКС}}$, температурный коэффициент выходного сигнала

$$\frac{1}{U_{\text{ВЫХ}}} \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial T} = \frac{R_{\epsilon_1} \Delta_{\text{ТКС}}}{R_{\epsilon_1} + R_{\epsilon_2}} \quad (71)$$

резко возрастает и при $R_{\epsilon_1} \approx R_{\epsilon_2}$ составляет $\approx 0,5 \Delta_{\text{ТКС}}$.

Очевидно, применение тензорезисторов из одного и того же сплава еще не избавляет от влияния температуры, поскольку ТКС у конкретных образцов, как указано выше, может изменяться от $-0,002$ до $+0,002$ %/К. В связи с этим оказывается необходимым индивидуальный контроль и подбор ТКС даже при столь малых его значениях.

Тензорезисторы полумоста должны располагаться на деформируемой основе, в простейшем случае — непосредственно на вмораживаемом цилиндрическом стержне таким образом, чтобы один из них был подвержен деформации, а второй выполнял лишь роль компенсационного. Один из вариантов такого расположения следующий: деформируемый тензорезистор располагается по образующей стержня, а компенсационный — поперек, по окружности. Находясь на одной и той же подложке, тензорезисторы имеют практически одну и ту же температуру и при одинаковых ТКС обеспечивают получение независимого от температуры выходного сигнала. В таком варианте конструкции чувствительность полумоста к деформации, получаемая из (68) с учетом (67), следующая:

$$\frac{1}{U_{\text{ВЫХ}}} \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial \epsilon} = \frac{R_{\epsilon_1}}{R_{\epsilon_1} + R_{\epsilon_2}} \left(\frac{1}{R_{\epsilon_2}} \frac{\partial R_{\epsilon_2}}{\partial \epsilon} \right) = \frac{R_{\epsilon_1} k_{\epsilon_2}}{R_{\epsilon_1} + R_{\epsilon_2}} \quad (72)$$

Однако при этом остается неиспользованной тензочувствительность компенсационного резистора, что снижает максимально возможную чувствительность схемы полумоста. В связи с этим более целесообразно ре-

лизовать конструкцию таким образом, чтобы один из тензорезисторов испытывал деформацию растяжения, а второй — деформацию сжатия. В этом случае изменения сопротивлений R_{e1} и R_{e2} окажутся противоположными по знаку и чувствительность полумоста к деформации составит

$$\frac{1}{U_{\text{ВЫХ}}} \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial T} = \frac{2R_{e1}k_e}{R_{e1} + R_{e2}} \quad (73)$$

при $k_{e1} = k_{e2} = k_e$ т. е. чувствительность оказывается в 2 раза большей по сравнению с предыдущим вариантом.

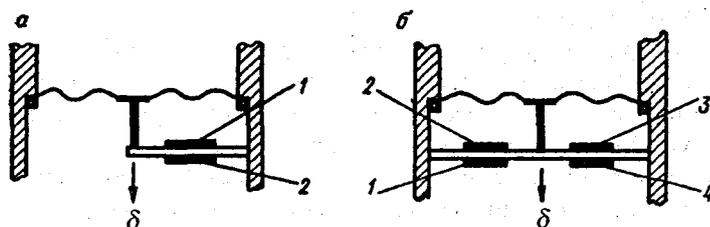


Рис. 35. Конструкции тензорезистивных ИП с разделительными мембранами

Реализация такой конструкции очень интересна в том случае, когда в качестве деформируемой несущей основы тензорезисторов используется отдельная упругая пластинка (балка), деформируемая за счет связи с жестким центром перемещающегося в результате деформаций льда элемента — мембраны (рис. 35 а), штока, воздействующего на жесткий центр разделительной мембраны, и т.д.. При перемещении центра δ , указанного стрелкой, тензорезистор 1, очевидно, будет испытывать деформацию растяжения, а тензорезистор 2 — деформацию сжатия.

В схеме четырехплечного моста (см. рис. 34, б) потенциалы точек 1 и 2 (φ_1 и φ_2) в зависимости от температуры должны изменяться одинаково, а в зависимости от деформации — противоположным образом. В таком случае значение выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$, являющегося разностью потенциалов φ_1 и φ_2 , окажется независимым от температуры при равенстве ТКС тензорезисторов и будет иметь повышенную чувствительность к деформации.

На рис. 35 б представлен вариант реализации такой конструкции. Тензорезисторы наклеены с двух сторон на упругую пластину, центр которой жестко связан с центром разделительной мембраны. При перемещениях δ , указанных стрелкой, тензорезисторы 1 и 4 (R_{e1} и R_{e4}) испытывают деформации сжатия, а тензорезисторы 2 и 3 (R_{e2} и R_{e3}) — деформацию растяжения. При этом изменение потенциалов точек 1 и 2 (см. рис. 34 б) составит:

$$\frac{1}{\varphi_1} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \varepsilon} = \frac{2R_{e1}k_e}{R_{e1} + R_{e2}}; \quad (74)$$

$$\frac{1}{\varphi_2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \varepsilon} = - \frac{2R_{\varepsilon_3} k_{\varepsilon}}{R_{\varepsilon_3} + R_{\varepsilon_4}} \quad (75)$$

при $k_{\varepsilon_1} = k_{\varepsilon_2} = k_{\varepsilon_3} = k_{\varepsilon_4} = k_{\varepsilon}$.

Изменения выходного сигнала

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial \varphi_1}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial \varepsilon} \cong \frac{4R_{\varepsilon_1} k_{\varepsilon}}{R_{\varepsilon_1} + R_{\varepsilon_2}} \varphi_1 \quad (76)$$

при $R_{\varepsilon_1} \approx R_{\varepsilon_3}, R_{\varepsilon_2} \approx R_{\varepsilon_4}, \varphi_1 \approx \varphi_2$.

Таким образом, чувствительность подобной конструкции возрастет в 4 раза по сравнению с конструкцией с одиночным деформируемым тензорезистором (72) и в 2 раза по сравнению с конструкцией на рис. 35 а.

Автоматическая температурная компенсация в схеме четырехплечного моста при равенстве ТКС тензорезисторов достигается, в той же мере, что и в схеме полумоста. При различных ТКС возможны два варианта: 1) различия между R_{ε_1} и R_{ε_2} и между R_{ε_3} и R_{ε_4} , имеющие одинаковые знаки $\Delta_{\text{ТКС}}$ автоматически компенсируются в результате вычитания потенциалов φ_1 и φ_2 ; 2) аналогичные различия, имеющие разные знаки, усиливаются за счет вычитания потенциалов. Таким образом, в общем случае схема четырехплечного моста требует не менее тщательного, чем ранее, подбора и контроля ТКС.

Серийно изготавливаемые проволочные тензорезисторы (рис. 36) выполняются как в виде проволочной сетки, наклеенной на подложку (I), так и в виде сетки из узких полосок фольги (II — VI). Фольговые резисторы обладают рядом преимуществ. За счет расширенных соединений между полосками у них практически устраняется поперечная тензочувствительность. Технология изготовления фольговых резисторов намного проще и заключается в том, что наклеенную на подложку фольгу протравливают в соответствии с заданной конфигурацией сетки. Фольговые резисторы выпускаются одиночные (II), с дополнительной термокомпенсацией путем подключения участка проволоки с обратным ТКС (III), в виде наборов (IV, V), в которых сетки резисторов расположены под заданным углом друг к другу, в виде пары взаимно перпендикулярных сеток резисторов (VI), один из которых может использоваться как рабочий, а второй — как компенсационный.

При использовании в измерительных преобразователях проволочные тензорезисторы вместе с подложкой наклеиваются на базовую основу — упругую балку непосредственно на деформируемый лдом элемент и т.д. При этом могут использоваться только некоторые виды клеев, поскольку их характеристики сильно влияют на метрологические свойства преобразователей. К клеям предъявляются следующие основные требования: высокое удельное электрическое сопротивление во избежание шунтирования, хорошая адгезия к материалу базовой основы и к материалу тензорезистора, высокие когезионные свойства, химическая инертность к материалу

тензорезистора, равенство коэффициентов теплового расширения клея и материала базовой основы, влагостойкость и т.д.

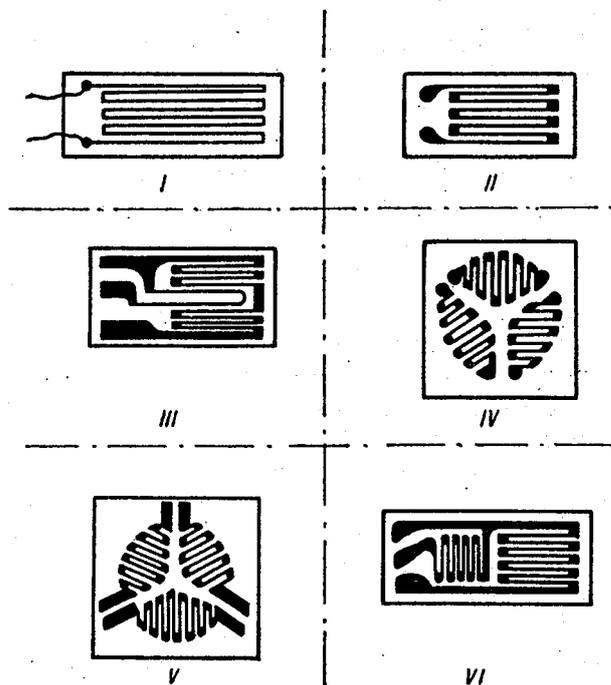


Рис. 36. Конструкции проволочных тензорезисторов

Таким требованиям в достаточно полной мере удовлетворяют следующие клеи и лаки:

- 1) бутварно-фенольно-формальдегидные клеи БФ-2, БФ-4;
- 2) винифлексовые лаки ВЛ-4, ВЛ-5, ВЛ-6, ВЛ-9, ВЛ-931, ВС10Т;
- 3) кремненитроглифталевый клей 192Т;
- 4) эпоксидный клей Д86;
- 5) эпоксидно-полиамидные клеи ВК-9, К-400, К-300-6Т;
- 6) однокомпонентный клей ЦИАКРИН.

При необходимости повысить влагозащищенность наклеенные тензорезисторы дополнительно покрывают электротехническими лаками, например УР-231.

Полупроводниковые тензорезисторы. По сравнению с проволочными тензорезисторами значительно более перспективными для применения в измерительной технике в настоящее время представляются полупроводниковые. Это обусловлено в основном тем, что их коэффициент тензочувствительности примерно на два порядка выше, чем проволочных.

Различают продольную, поперечную и сдвиговую тензочувствительность. Характеристики каждой из них зависят от того, каким образом тензопластинка вырезана из кристалла. В большинстве практически реализуемых вариантов ориентацию пластинки стремятся сделать такой, чтобы сдвиговая чувствительность была близка нулю, в результате у серийно выпускаемых тензометров учитываются обычно лишь продольная и поперечная чувствительности.

Зависимость сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации в направлении продольной оси

$$R_\epsilon = R_0 (1 + k_1 \epsilon + k_2 \epsilon^2), \quad (77)$$

где R_0 — сопротивление ненагруженного тензорезистора; k_1 и k_2 — коэффициенты; ϵ — значение относительной деформации.

Полупроводниковые тензорезисторы из-за их хрупкости могут использоваться в ограниченном диапазоне относительных деформаций ϵ . Паспортное значение разрушающей деформации для типов КТЭ и КТД составляет $\epsilon_p \approx \pm 3 \cdot 10^{-3}$, причем при разработке приборов предельные значения деформаций целесообразно выбирать намного меньшими — до $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^{-3}$. Это связано с тем, что отдельные экземпляры серийных резисторов при растяжении оказываются неспособными выдержать паспортное значение деформации.

Как и проволочные, полупроводниковые тензорезисторы в преобразователях наклеиваются на базовую основу обычно такими же клеями. Поскольку базовая основа, как правило, испытывает деформации не только в направлении продольной оси тензорезистора, то на практике учитывают оба вида тензочувствительности (продольная и поперечная [9]).

Если действующее напряжение σ сдвинуто относительно продольной оси тензорезистора на угол φ , то составляющие этого напряжения вдоль и поперек оси тензорезистора окажутся равными:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma \cos^2 \varphi; \\ \sigma_{90} &= \sigma \sin^2 \varphi. \end{aligned} \quad (78)$$

При этом относительное изменение сопротивления тензорезистора определяется выражением

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k_0 \sigma}{E} \cos^2 \varphi + \frac{k_{90} \sigma}{E} \sin^2 \varphi, \quad (79)$$

где k_0 — коэффициент продольной тензочувствительности, определяемый в соответствии с выражением

$$k_0 = \frac{\Delta R}{\epsilon R_0} = k_1 + k_2 \epsilon, \quad (79a)$$

а E — модуль Юнга.

Поскольку $\varepsilon = \sigma/E$, то из выражения (79) легко получается результирующий коэффициент тензочувствительности при произвольном значении φ

$$k_{\varphi} = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} = k_0 \cos^2 \varphi + k_{90} \sin^2 \varphi. \quad (80)$$

Полупроводниковые тензорезисторы, кроме повышенной на два порядка тензочувствительности, по сравнению с проволочными характеризуются, к сожалению, также и повышенной термочувствительностью. Температурный коэффициент сопротивления составляет примерно 0,2 %/К для тензорезисторов КТД и 0,1 ÷ 0,25 %/К для КТЭ. Кроме этого, для них характерен температурный коэффициент тензочувствительности, составляющий для КТД 0,15 ÷ 0,25 %/К, для КТЭ 0,25 ÷ 0,4 %/К. Пренебрежение этими коэффициентами приводит к значительным дополнительным погрешностям. Например, при измерении деформации порядка $5 \cdot 10^{-4}$ при $k_0 \approx 130$ неучет ТКС обусловит появление погрешности (в процентах)

$$\Delta_t = \frac{\alpha \Delta T}{k_0 \varepsilon} \approx 3,1 \Delta T.$$

Стремление скорректировать нелинейность функции преобразования (77) и повысить температурную стабильность приводит к целесообразности использования в качестве ИП парного количества тензорезисторов (два или четыре), включаемых, как и проволочные, в варианте полумоста (см. рис. 34 а) либо четырехплечного моста (см. рис. 34 б).

Поскольку для схемы на рис. 34 а значение выходного сигнала определяется выражением (68), то в случае, когда тензорезистор R_{e2} испытывает напряжение сжатия, а R_{e1} — напряжение растяжения, при равенстве их характеристик (R_0 , k_1 и k_2) получаем

$$U_{\text{вых}} = \varphi(\varepsilon) = 0,5 U_{\text{п}} \left(1 - \frac{k_1 |\varepsilon|}{1 + k_2 \varepsilon^2} \right). \quad (81)$$

При реальных значениях k_1 и k_2 нелинейность выражения (81) не превышает 1 % в диапазоне $\varepsilon = 0 \div 10^{-3}$.

С учетом температурных зависимостей, характерных для полупроводниковых тензорезисторов, выражение (68) может быть записано в следующем виде:

$$\varphi(\varepsilon, T) = \frac{U_{\text{п}} R_{02} (1 + \alpha_2 \Delta T) [1 - k_{02} (1 + \xi_2 \Delta T) |\varepsilon|]}{R_{01} (1 + \alpha_1 \Delta T) [1 + k_{01} (1 + \xi_1 \Delta T) |\varepsilon|] + R_{02} (1 + \alpha_2 \Delta T) [1 - k_{02} (1 + \xi_2 \Delta T) |\varepsilon|]}, \quad (82)$$

где индексами 1 и 2 обозначены значения соответствующих характеристик тензорезисторов R_{e1} и R_{e2} ; α_1 и α_2 — температурные коэффициенты сопротивления; ξ_1 и ξ_2 — температурные коэффициенты тензочувствительности; k_{01} и k_{02} — коэффициенты продольной тензочувствительности в соответствии с определением в выражении (79а).

Здесь принято $\alpha = \text{const}$ и $\xi = \text{const}$, ввиду того что рассматривается узкий температурный диапазон ($-30 \div 0^\circ\text{C}$), где изменчивостью α и ξ можно пренебречь [84].

При идеализированных условиях полной идентичности тензорезисторов ($R_{01} = R_{02}$, $\alpha_1 = \alpha_2$, $\xi_1 = \xi_2 = \xi$, $k_{01} = k_{02} = k_0$) выражение (82) легко сводится к виду

$$\varphi(\varepsilon, T) = 0,5U_{\Pi} [1 - k_0 (1 + \xi \Delta T) |\varepsilon|]. \quad (83)$$

При этом температурный коэффициент выходного сигнала ИП будет следующим:

$$\frac{1}{\varphi(\varepsilon, T)} \frac{\partial \varphi(\varepsilon, T)}{\partial T} = - \frac{k_0 \xi |\varepsilon|}{1 - k_0 (1 + \xi \Delta T) |\varepsilon|}, \quad (84)$$

а температурный коэффициент полезной части сигнала, выражаемой в виде

$$\varphi(\varepsilon, T) - 0,5U_{\Pi} = -0,5U_{\Pi} k_0 |\varepsilon| [1 + \xi \Delta T] \quad (85)$$

оказывается равным ξ .

Таким образом, идентичность пары тензорезисторов в схеме полумоста не обеспечивает полной термокомпенсации.

По-видимому, определенный интерес может представлять использование тензорезисторов с заданным различием температурных коэффициентов. Такое различие может быть получено из выражения (82).

Поскольку в общем случае

$$\frac{\partial \varphi(\varepsilon, T)}{\partial T} = U_{\Pi} \frac{R_{\varepsilon 1} \frac{\partial R_{\varepsilon 2}}{\partial T} - R_{\varepsilon 2} \frac{\partial R_{\varepsilon 1}}{\partial T}}{(R_{\varepsilon 1} + R_{\varepsilon 2})^2}, \quad (86)$$

то полная термокомпенсация в схеме полумоста обеспечивается при условии

$$\frac{1}{R_{\varepsilon 1}} \frac{\partial R_{\varepsilon 1}}{\partial T} = \frac{1}{R_{\varepsilon 2}} \frac{\partial R_{\varepsilon 2}}{\partial T}, \quad (87)$$

которое приводит к выражению:

$$\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{(1 + \alpha_2 \Delta T)(1 + \alpha_1 \Delta T)} = \frac{k_{01} \xi_1 |\varepsilon|}{1 + k_{01} (1 + \xi_1 \Delta T) |\varepsilon|} + \frac{k_{02} \xi_2 |\varepsilon|}{1 - k_{02} (1 + \xi_2 \Delta T) |\varepsilon|}. \quad (88)$$

К сожалению, в условие (88) входит $|\varepsilon|$ и полная термокомпенсация во всем диапазоне измерений по-прежнему оказывается невозможной. Однако если требуемые различия между α_2 и α_1 установить для середины диапазона ε , то термокомпенсация оказывается все же более эффективной, чем при идентичности коэффициентов.

Например, при некотором $|\varepsilon| = 10^{-3}$, $k_{01} \approx k_{02} \approx 120$, $\xi_1 \approx \xi_2 \approx -0,002 \text{ K}^{-1}$ и $\Delta T = 20 \text{ K}$ значение $(\alpha_2 - \alpha_1) \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Чтобы обеспечить такую разность, возьмем $\alpha_1 \approx 0,0025 \text{ K}^{-1}$ и $\alpha_2 \approx 0,002 \text{ K}^{-1}$ и определим температурный коэффициент выходного сигнала при $\varepsilon = 0$, учитывая, что в середине диапазона ($|\varepsilon| = 10^{-3}$) этот коэффициент равен нулю в соответствии с (88). Поскольку при $\varepsilon = 0$ и $R_{01} \approx R_{02}$

$$\varphi(\varepsilon, T) \approx \frac{U_{\text{п}}(1 + \alpha_2 \Delta T)}{2 + (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta T} = \varphi_0(\varepsilon) [1 + t_{\varphi} \Delta T], \quad (89)$$

где

$$t_{\varphi} = \frac{1}{\varphi(\varepsilon, T)} \frac{\partial \varphi(\varepsilon, T)}{\partial T} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2 + (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta T},$$

то для рассмотренных условий $t_{\varphi} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, что более чем в 2 раза меньше аналогичного коэффициента по выражению (84) для того же диапазона ε .

Рассмотрим методы термокомпенсации с применением полупроводниковых терморезисторов (ППТР). Такая возможность компенсации обусловлена тем, что ТКС у ППТР и у тензорезисторов имеют противоположные знаки. Получение же у ППТР линейной характеристики с требуемым постоянным значением ТКС в диапазоне рабочих значений температуры обеспечивается включением ППТР в двухполюсник, содержащий постоянные резисторы [79]. Естественно, при этом компенсируется лишь влияние температуры на сопротивление тензорезистора, но не на его тензочувствительность.

Двухполюсник, содержащий ППТР, включается последовательно с тензорезистором (рис. 37), причем конструктивно ППТР должен размещаться на той же базовой основе, что и тензорезистор.

Принцип линеаризации температурной характеристики ППТР состоит в ее преобразовании в кривую с перегибом. Точка перегиба задается в середине рабочего диапазона. Для схемы, приведенной на рис. 37 условия перегиба могут быть записаны в виде

$$r_1 + r_2 = \frac{B - 2T_n}{B + 2T_n} R_m, \quad (90)$$

где R_m — сопротивление ППТР в точке перегиба; B — постоянная ППТР, К; $T_n = 273 + t_n$ — температура точки перегиба.

Поскольку

$$\alpha = \frac{1}{R_{\varepsilon}} \frac{\partial R_{\varepsilon}}{\partial T} \text{ при } |\varepsilon| = \text{const},$$

то можно задаться условием

$$\frac{\partial R_{\varepsilon}}{\partial T} + \frac{\partial R_d}{\partial T} = 0, \quad (91)$$

где R_d — сопротивление компенсирующего двухполюсника.

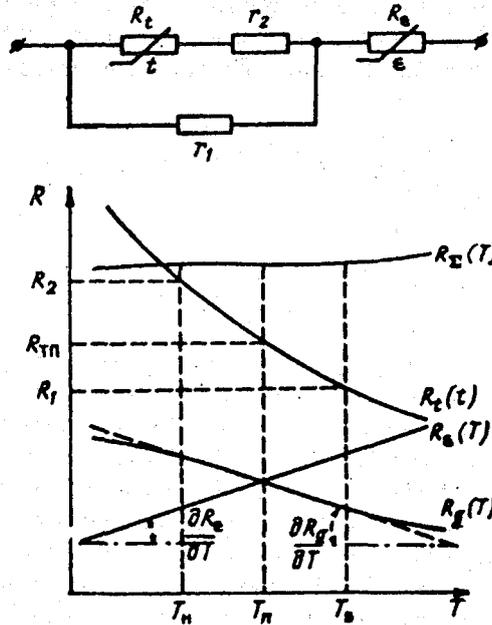


Рис.37. Коррекция влияния температуры с использованием ППТР

Из (90) и (91) получаем

$$R_{\epsilon} \alpha - \frac{r_1^2 (B + 2T_n)^2}{4BR_n T_n^2} = 0. \quad (92)$$

Отсюда несложно находится r_1

$$r_1 = \frac{2T_n \sqrt{BR_n R_{\epsilon} \alpha}}{B + 2T_n}. \quad (93)$$

Рассмотренный способ термокомпенсации с помощью ППТР обладает весьма важным недостатком — снижением тензочувствительности. Действительно, для схемы на рис. 37 коэффициент тензочувствительности

$$k_{0d} = \frac{1}{R_{\epsilon} + R_d} \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \epsilon} \ll k_0 = \frac{1}{R_{\epsilon}} \frac{\partial R_{\epsilon}}{\partial \epsilon}. \quad (94)$$

Для схемы четырехплечного моста (см. рис. 34 б) выходной сигнал является разностью сигналов двух плеч моста, тензорезисторы которых

деформируются противоположным образом. При условиях равенства всех характеристик тензорезисторов (α , ξ , R_0 и k_0) полное выражение для выходного сигнала легко преобразуется к виду

$$U_{\text{вых}}(\varepsilon, T) = U_n k_0 |\varepsilon| (1 + \xi \Delta T). \quad (95)$$

Таким образом, при поставленных условиях в схеме четырехплечного моста, как и в схеме полумоста, обеспечивается компенсация ТКС тензорезисторов, но, к сожалению, остается некомпенсированной температурная зависимость тензочувствительности. Однако, если для схемы четырехплечного моста задать различия коэффициентов α в левом и правом полумостах (см. рис. 34 б), то положение, очевидно, существенно изменится. Действительно, установив различия для левого полумоста в соответствии с (88), а для правого

$$\frac{\alpha_4 - \alpha_3}{(1 + \alpha_3 \Delta T)(1 + \alpha_4 \Delta T)} = \frac{k_{03} \xi_3 |\varepsilon|}{1 + k_{03} (1 + \xi_3 \Delta T) |\varepsilon|} - \frac{k_{03} \xi_3 |\varepsilon|}{1 + k_{04} (1 + \xi_4 \Delta T) |\varepsilon|} \quad (96)$$

получим для середины диапазона $|\varepsilon|$ полную компенсацию для каждого из потенциалов, а для $|\varepsilon| = 0$

$$U_{\text{вых}}(\varepsilon, T) = \varphi_{01}(\varepsilon) [1 + t_{\varphi 1} \Delta T] - \varphi_{02}(\varepsilon) [1 + t_{\varphi 2} \Delta T], \quad (97)$$

где $\varphi_{01}(\varepsilon)$ — значение потенциала в точке 1 при $|\varepsilon| = 0$; $\varphi_{02}(\varepsilon)$ — значение потенциала в точке 2 при $|\varepsilon| = 0$;

$$t_{\varphi 1} = \frac{1}{\varphi_1} \frac{\partial \varphi_1}{\partial T} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2 + (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta T};$$

$$t_{\varphi 2} = \frac{1}{\varphi_2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial T} = \frac{\alpha_4 - \alpha_3}{2 + (\alpha_3 + \alpha_4) \Delta T}.$$

Таким образом, при одинаковых значениях потенциалов в точках 1 и 2 при $|\varepsilon| = 0$, что вполне естественно, и при равенстве значений температурных коэффициентов этих потенциалов результирующий температурный коэффициент выходного сигнала в этой точке ($|\varepsilon| = 0$) также оказывается равным нулю.

Несомненно, что рассмотренные условия равенства либо различий коэффициентов в исходном варианте схем (см. рис. 34) могут быть реализованы только путем подбора, что обуславливает довольно низкую технологичность ИП. Для повышения технологичности целесообразно использовать методы подстройки коэффициентов под требуемые условия компенсации.

Одним из методов такой подстройки является включение двухполосника с ППТР в один из полумостов в схеме четырехплечного моста (рис.

38 а), рассматриваемый в работах [24, 84]. Путем выбора номиналов резисторов r_1 и r_2 осуществляется одновременно подстройка ТКС и балансировка моста [24], при этом температурный коэффициент тензочувствительности не корректируется.

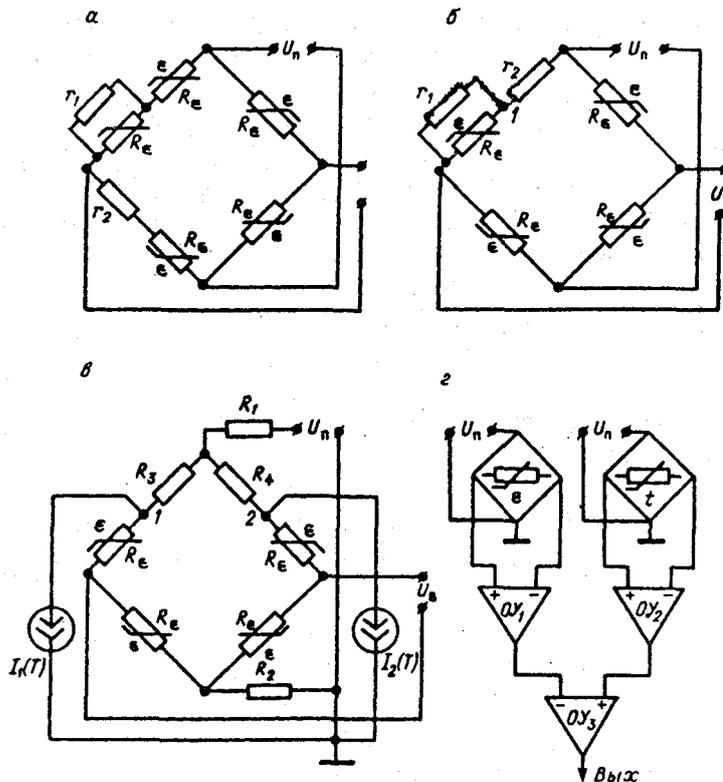


Рис.38.Схемы компенсации ТКС тензорезисторов

Более удачным представляется метод с использованием шунтирующих и добавочных постоянных резисторов (см. рис. 38 б), рассматриваемый в работах [24, 67]. Этот метод существенно проще предыдущего и намного технологичнее в связи с отсутствием специальным термочувствительного резистора, как на рис. 37 а, который должен размещаться на той же подложке, что и тензорезистор моста. Хотя, конечно, схема с терморезистором обладает более широким диапазоном подстройки.

Схема с шунтирующим и добавочным резисторами использована в преобразователях фирмы “Вэлвайн Электрик” (*Welwyn Electric*) [79]. Температурный коэффициент выходного сигнала этих преобразователей при $|\epsilon| = 0$ не превышает $0,01\% / \text{K}$ в диапазоне $0 \div 60^\circ\text{C}$. В ИП фирмы “Кулайт Семикондактор” (*Kulite Semiconductor*) применение подобной схемы по-

зволило получить аналогичный коэффициент не более 0,18 % /К в диапазоне $-25... + 80$ °С.

Варианты схем на рис. 38 *а* и *б* могут быть названы пассивными. В отличие от них схемы *в* и *г* являются активными схемами термокомпенсации, причем, как и предыдущие, они предназначены для компенсации влияния коэффициентов α тензорезисторов на выходной сигнал, но не коэффициентов тензочувствительности.

В схеме на рис. 38 *в* независимые токи $I_1(T)$ и $I_2(T)$, протекая через резисторы R_3 и R_4 , обеспечивают требуемую для компенсации изменчивость потенциалов точек 1 и 2. Выбором номиналов резисторов R_1+R_4 и значений токов устанавливается также исходная балансировка моста. Генераторами токов являются биполярные транзисторы, требуемый режим которых задается дополнительными резистивными делителями.

В схеме на рис. 38 *г* принципиально разделены узлы преобразования температуры и деформации. И тот, и другой преобразователи выполнены в виде четырехплечных мостов, сигналы с выходных диагоналей которых подаются на предварительные операционные усилители OY_1 и OY_2 осуществляющие масштабирование с заданными коэффициентами. Выходы OY_1 и OY_2 , подключены к дифференциальным входам усилителя OY_3 . Благодаря вычитанию сигналов в OY_3 его выходной сигнал оказывается не зависящим от температуры.

В некоторых ИП, изготовленных по интегральной технологии используются схемы термостабилизации базовой основы тензометрического моста, а зачастую одновременно — и чувствительного элемента. Несомненно, это интересный и качественный путь коррекции влияния температуры, однако он требует довольно больших мощностей в цепи термостабилизации и, как правило, подогрева по отношению к окружающей среде (микрохолодильники для задач термостабилизации практически не используются). В связи с этим для ледовых измерений подобный путь малоприменим.

Для температурной компенсации тензочувствительности также могут использоваться пассивные и активные схемы (рис. 39). Основным принципом пассивных схем состоит в управляемом изменении напряжения питания моста. Возможность осуществления такого принципа заключается в следующем.

Рассмотрим выходной сигнал моста в виде

$$U_{\text{ВЫХ}}(\varepsilon, T) = U_n [1 + k_m |\varepsilon| (1 + \xi_m \Delta T)], \quad (98)$$

где k_m — коэффициент тензочувствительности моста; ξ_m — температурный коэффициент тензочувствительности; U_n — напряжение питания моста.

Полная температурная компенсация тензочувствительности, очевидно, будет обеспечена при условии

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}(\varepsilon, T)}{\partial \varepsilon} \right) = 0. \quad (99)$$

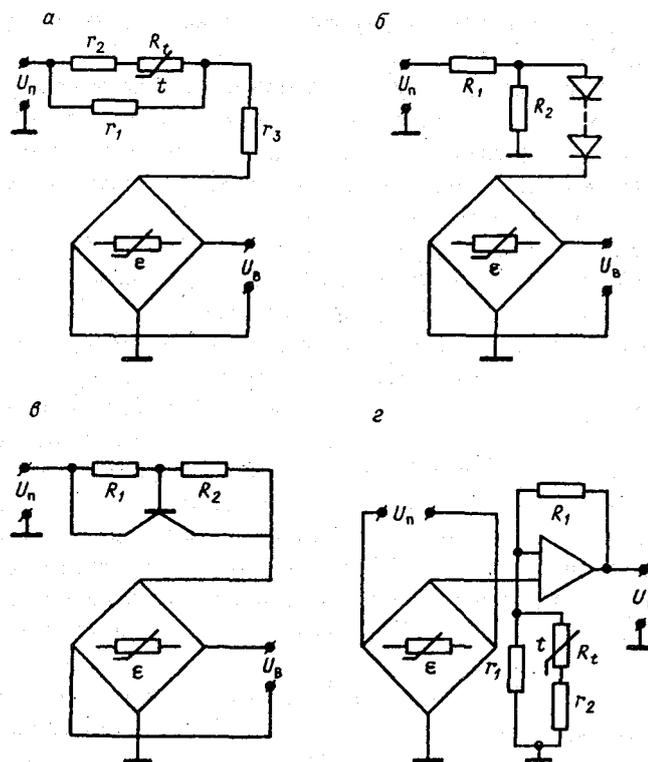


Рис.39. Схемы компенсации влияния температуры на тензочувствительность

Отсюда следует, что при $U_n = \text{var} = U_n(T)$ результирующий коэффициент

$$\xi_n = \frac{1}{U_n(T)} \frac{dU_n(T)}{dT} = -\frac{\xi_m}{1 + \xi_m \Delta T}. \quad (100)$$

Таким образом, если температурный коэффициент напряжения $U_n(T)$ задать примерно равным по модулю температурному коэффициенту тензочувствительности, то с некоторым приближением это обеспечит условия термокомпенсации. Причем приближение оказывается достаточно хорошим. Действительно, при реальном $\xi_m = -2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне $0 \dots 20^\circ\text{C}$ значение ξ_n для середины диапазона составит $2,04 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, при этом $\Delta \xi_n \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, т. е. некомпенсированное значение термочувствительности не превысит $\pm 0,004 \% / \text{K}$.

Возможный вариант реализации рассмотренного принципа показан на рис. 39 а. В цепь питания последовательно с тензомостом включен термозависимый двухполюсник, содержащий постоянные резисторы и ППТР. Для такой схемы

$$\frac{1}{U_n(T)} \frac{dU_n(T)}{dT} = - \frac{1}{R_d + R_m} \frac{dR_d}{dT}, \quad (101)$$

где R_d — сопротивление двухполюсника; R_m — сопротивление моста, причем $R_m \neq f(T)$.

Требуемое значение ТКС двухполюсника легко достигается выбором r_1, r_2, r_3 [79]. С целью уменьшения влияния вариаций R_m на условия термокомпенсации целесообразно установить $R_d \gg R_m$.

Частным случаем схемы на рис. 39 а является схема с постоянным дополнительным резистором в цепи питания (вместо термозависимого двухполюсника). Возможность ее использования вызвана тем, что при отсутствии специальной компенсации ТКС тензорезисторов моста (т.е. коэффициентов α) результирующий ТКС R_m будет положительным. Соответственно окажется положительным температурный коэффициент U_n , что и требуется по условию термокомпенсации (101). Значение этого коэффициента устанавливается подстройкой номинала дополнительного резистора. Такой упрощенный вариант использован в преобразователях фирмы "Вэлвайн Электрик" (*Welwyn Electric*), что позволило уменьшить температурный коэффициент тензочувствительности с 0,3 до 0,01 % /К.

Примерное сопротивление дополнительного резистора R_d в работе [24] предлагается выбирать из соотношения

$$R_d = \frac{1 + \alpha \Delta T}{\alpha - \xi} R_m \quad (102)$$

при условии $\alpha > \xi$. В противном случае метод не может быть реализован.

При компенсации с помощью ППТР влияние α моста невыполнение условия $R_d \gg R_m$ тоже должно учитываться, и в этом случае выражение (101) требует соответствующей коррекции.

Эффект термокомпенсации также достигается включением последовательно с мостом цепочки кремниевых диодов, смещенных в прямом направлении (см. рис. 39 б). Как известно, температурный коэффициент падения напряжения на $p-n$ переходе (ТКН) составляет в среднем (-2) мВ/К и практически не меняется в широком диапазоне температуры. При этом падение напряжения на цепочке N последовательно включенных диодов можно представить в виде

$$\sum_1^N U_d = N(U_{d0} + r_d I + \chi \Delta T),$$

где $U_{d0} = 0,65$ В для кремниевых диодов; r_d — дифференциальное сопротивление диода; I — ток через диод; χ — ТКН U_d

Выбор требуемого числа диодов производится из соотношения

$$\frac{N\chi}{U_{R1} + N(U_{d0} + r_d I)} \geq \frac{\xi}{1 + \xi \Delta T}, \quad (103)$$

где U_{R1} — падение напряжения на резисторе R_1 .

Дальнейшая подстройка цепи термокомпенсации под требуемый коэффициент осуществляется с помощью шунтирующего резистора R_2 . При этом зачастую оказывается целесообразным учитывать влияние α , как и в предыдущем случае.

Более широко используются транзисторные схемы компенсации (см. рис. 39 в), особенно при интегральной технологии изготовления ИП. Включенный в цепь питания моста транзистор эквивалентен N последовательно включенным диодам при соотношении $R_1 = R_2(N - 1)$, причем здесь N может принимать любое, в том числе дробное значение. Схема позволяет осуществлять термокомпенсацию чувствительности более чем на два порядка.

В активных схемах (см. рис. 39 г) используются дифференциальные операционные усилители, на неинвертирующий вход которых подается сигнал с выхода тензометрического моста, а по второму входу (–) регулируется коэффициент усиления ОУ, причем зависимость коэффициента от температуры обеспечивается за счет включения в цепь регулирования двухполюсника с ППТР. Характеристика двухполюсника с помощью резисторов r_1 и r_2 задается линейной. Выходной сигнал ОУ, равный

$$U_{\text{в}} = K_y(T) U_{\text{вх}}(T) \quad (104)$$

вследствие противоположных знаков температурных коэффициентов у $K_y(T)$ и $U_{\text{вх}}(T)$ оказывается взаимно скомпенсированным и при соответствующем выборе значения $K_y(T)$, которое связано с R_1 , практически не зависит от температуры.

ИП деформаций на основе полупроводниковых тензорезисторов в последнее время получают все более широкое распространение благодаря столь существенному преимуществу, как повышенная почти на два порядка по сравнению с проволочными тензочувствительность. Какое-то время их внедрение сдерживалось недостаточной разработанностью методов коррекции нелинейности и особенно методов компенсации влияния температуры. В настоящее время при изготовлении серийных тензорезисторов широко используется интегральная технология. При этом тензорезисторы наносятся на базовую основу одновременно со схемами температурной компенсации.

3.2.2. Индуктивные преобразователи

В индуктивных преобразователях деформация чувствительного элемента обуславливает воздействие на один или несколько определяющих параметров магнитной цепи, что вызывает изменение индуктивности. Как сигнал измерительной информации изменение индуктивности в большинстве случаев является более перспективным для измерительных цепей, чем

изменение сопротивления, особенно в случае дальнейшего преобразования в сигнал частотно-модулированного типа.

Конкретные конструкции преобразователей обусловлены выбором вида воздействия на параметры магнитной цепи. Преимущественное распространение получили конструкции, у которых перемещение чувствительного элемента обуславливает изменения полной магнитной проницаемости катушки индуктивности либо за счет изменений положения ферромагнитного сердечника (рис. 40 *a*), либо в результате изменений геометрии (толщины, площади) зазора в замкнутой магнитной цепи (см. рис. 40 *б, в, з*). Несколько меньше распространены преобразователи изменяющейся взаимной индуктивностью (см. рис. 40 *a*) и токовихревые преобразователи (см. рис. 40 *б*).

Для преобразователей с перемещающимся ферромагнитным сердечником (см. рис. 40 *a*) связь индуктивности с перемещениями сердечника при условии, что начальное положение сердечника внутри катушки существенно больше радиуса катушки ($\delta \gg r$), может быть записана следующим образом [79]:

$$L \cong \frac{\mu_0 w s [l + (\mu_c - 1) \delta]}{l^2}, \quad (105)$$

где μ_0 — магнитная постоянная среды внутри катушки; w — число витков; s — площадь поперечного сечения катушки; μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника.

Перемещения сердечника, очевидно, эквивалентны изменениям δ . Тогда чувствительность преобразователя

$$K_L = \frac{dL}{d\delta} = \frac{\mu_0 w^2 s (\mu_c - 1)}{l^2}. \quad (106)$$

Таким образом, при условии $\delta \gg r$ чувствительность может считаться практически постоянной. При невыполнении этого условия становится необходимым учитывать неоднородный характер поля на концах соленоида и его влияние на функцию преобразования.

Преобразователи соленоидального типа используются обычно с чувствительными элементами, характеризующимися большими значениями перемещения. Весьма важным их недостатком является сильное влияние внешних магнитных полей, что связано с рассеянием магнитного потока вне пределов катушки.

В некоторых случаях целесообразно использовать дифференциальные преобразователи соленоидального типа, когда две катушки состыкованы друг с другом торцами, а сердечник длиной l в исходном положении находится ровно посередине, причем l меньше длины одной катушки. У таких преобразователей есть некоторые достоинства, характерные вообще для дифференциальных схем, однако при этом появляется и весьма важный дополнительный недостаток — взаимное влияние магнитных полей обеих катушек друг на друга.

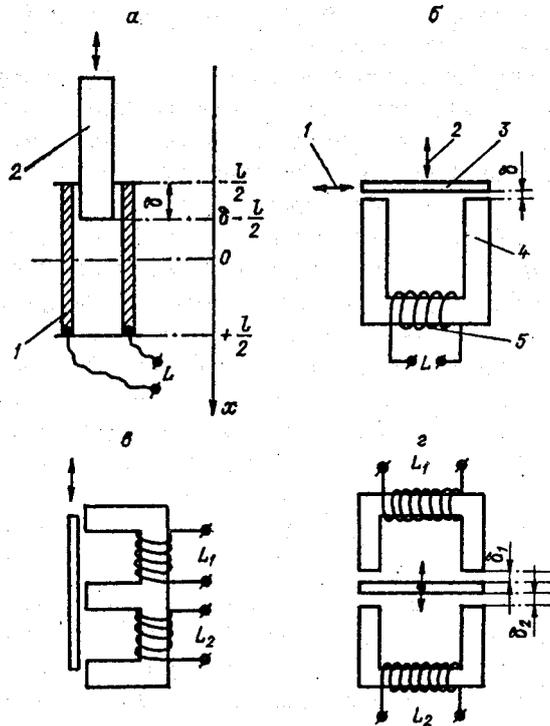


Рис.40. Индуктивные преобразователи с изменяемой геометрией магнитной цепи

Преобразователи с изменяющимся магнитным зазором (см. рис. 40 б) имеют практически замкнутую цепь (рассеянием в зазоре при его малой ширине обычно можно пренебречь) и в связи с этим могут считаться нечувствительными к внешним магнитным полям.

Преобразователи в общем случае содержат П-образный магнитопровод 4 с обмоткой 5 и подвижный участок (якорь) магнитопровода 3, способный перемещаться либо в направлении 2 (при этом изменяется толщина зазора δ), либо в направлении 1 (изменяется площадь зазора).

При малом значении δ индуктивность дросселя 5 без учета реактивного сопротивления, обусловленного потерями на вихревые токи и гистерезис, может быть задана выражением

$$L = \frac{w^2}{R_c + R_\delta} = \frac{w^2}{\frac{l_c}{\mu_0 \mu_c S_c} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}}, \quad (107)$$

где w — количество витков в катушке; R_c — магнитное сопротивление материала магнитопровода и якоря; R_δ — магнитное сопротивление зазора;

l — полная длина магнитной силовой линии при $\delta = 0$; μ_c — относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода и якоря; μ_0 — магнитная постоянная; s_c — площадь поперечного сечения магнитопровода; s_0 — площадь зазора.

Если якорь перемещается в направлении l , то чувствительность к изменениям площади

$$\frac{dL}{ds_0} = \frac{2\mu_0\mu_c^2\delta w^2 s_c^2}{(l_c s_0 + 2\delta\mu_c s_c)^2} \quad (108)$$

оказывается функцией s_0 , что обуславливает нелинейность зависимости $L(s_0)$.

Для конструкции, показанной на рис. 40 б, $s_0 = s_1 + ab$, где s_1 — неизменная площадь одного из зазоров, ab — меняющаяся площадь второго зазора, причем $b = \text{var}$. В таком случае чувствительность к перемещению

$$\frac{dL}{db} = \frac{2\mu_0\mu_c^2 a \delta w^2 s_c^2}{l_c (s_1 + ab) + 2\delta\mu_c s_c} \quad (109)$$

также зависит от b и $L(b)$ является нелинейной функцией (рис. 41 а).

При перемещениях якоря в направлении 2 (см. рис. 40 б) чувствительность

$$\frac{dL}{d\delta} = -\frac{2\mu_0\mu_c^2 w^2 s}{(l_c + 2\mu_c \delta)^2}, \quad (110)$$

где $s = s_0 = s_c$.

Зависимость $L(\delta)$ схематически показана на рис. 41 а.

Определенный интерес представляет одновременное воздействие на толщину и площадь зазора. В этом случае относительное изменение индуктивности

$$\frac{dL}{L} = \frac{\frac{ds_0}{s_0} + \frac{d\delta}{\delta}}{1 + \frac{l_c s_0}{2\mu_c s_c \delta}}, \quad (111)$$

что позволяет при соответствующем выборе геометрии зазора получать характеристику, достаточно близкую к линейной.

Большой чувствительностью и значительно лучшей линейностью обладают дифференциальные преобразователи с переменным зазором (см. рис. 40 в, з). При перемещениях якоря индуктивности L_1 и L_2 этих преобразователей изменяются противоположным образом. Включив эти индуктивности в счетные плечи моста переменного тока (см. рис. 41 б), вторая пара смежных плеч которого задана, например, постоянными индуктивностями $L_3 = L_4 = L$, характеристику моста в виде кривой с перегибом в точке $\delta = 0$. В окрестностях перегиба кривая с хорошим приближением может быть аппроксимирована прямой линией.

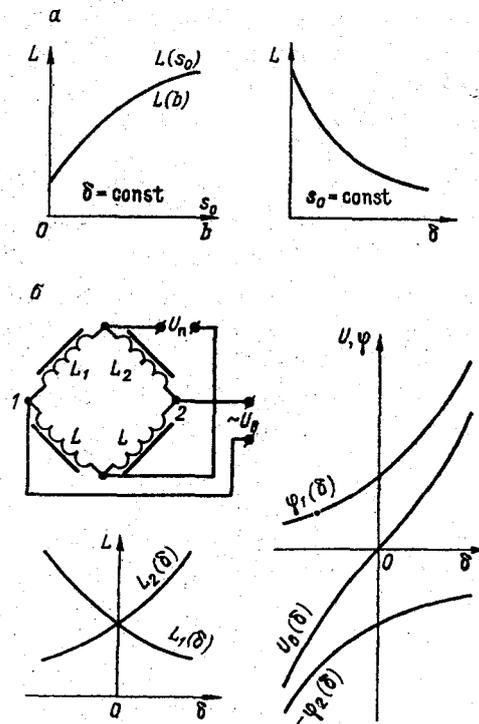


Рис.41. Основные зависимости и схема включения преобразователей с изменяемой геометрией магнитной цепи

На рис. 41 б схематически показаны зависимости $L_1(\delta)$ и $L_2(\delta)$ для дифференциального преобразователя в соответствии с рис. 40 г, а также — зависимости от δ потенциалов мостовой схемы в точках 1 и 2 ($\varphi_1(\delta)$ и $\varphi_2(\delta)$) и выходного напряжения моста при задании условий перегиба в точке $\delta = 0$. Условия перегиба задаются приравнением к нулю второй производной зависимости напряжения от δ .

Для преобразователя с изменяющейся площадью (см. рис. 40 в) принципиальная сущность этих зависимостей, очевидно, будет аналогичной.

Для реализации измерительных схем с преобразователями, имеющими подвижный ферромагнитный якорь, необходимо учитывать следующую весьма важную особенность. На якорь, например в преобразователе на рис. 40 б, действует одностороннее усилие притяжения к сердечнику

$$F_n = 0,5 I_2^2 \frac{dL}{d\delta}, \quad (112)$$

где I_2 — сила тока в обмотке.

Наличие силы F_n как функции δ приводит к искажениям характеристик преобразователей, а ее вариации — к дополнительным погрешностям преобразования. В конструкциях дифференциального типа эта особенность менее существенна, ввиду того что якорь взаимодействует одновременно с двумя сердечниками и на него действуют две разнонаправленные силы. Наиболее общий путь ослабления влияния F_n , заключается в уменьшении силы тока в обмотке.

Преобразователи с переменным зазором могут рассматриваться как устройства с изменяющимся активным магнитным сопротивлением R_δ в соответствии с выражением (107). При этом в анализе не рассматриваются потери на вихревые токи, т.е. реактивная составляющая полного магнитного сопротивления. В конструкциях устройств на рис. 40 б, в, г это вполне оправдано ввиду малости зазора δ и тем самым несущественности полей рассеяния.

При учете полей рассеяния выражение для индуктивности записывается в виде

$$L = \frac{w^2}{\sqrt{(R_c + R_\delta)^2 + X_m^2}},$$

где R_c и R_δ — как и ранее, магнитные сопротивления сердечника и зазора; X_m — реактивная составляющая магнитного сопротивления, обусловленная вихревыми токами и потерями на гистерезис в сердечнике.

Определенные преимущества при конструировании ИП деформаций имеет возможность воздействия на величину X_m . Естественно, при этом целесообразно устранить возможные потери на гистерезис, т.е. использовать конструкции ИП без ферромагнитных сердечников. Кроме этого, увеличения чувствительности можно добиться увеличением полей рассеяния, т.е. применением разомкнутой магнитной цепи.

Рассмотрим конструкцию ИП на рис. 42 а, которая содержит цилиндрический экран 1, выполненный в виде короткозамкнутой катушки, и катушку индуктивности 2. В такой конструкции эффективная индуктивность катушки 2 определяется выражением

$$L_f = L_0 \left(1 - \frac{r_1^2 l_2}{r_2^2 l_1} \right). \quad (113)$$

Отсюда следует, что чувствительность ИП

$$\frac{dL_f}{dl_2} = -\frac{L_0 r_1^2}{r_2^2 l_1} = \text{const}$$

и зависит только от соотношения радиусов экрана и катушки.

Таким образом, функция преобразования ИП может рассматриваться как линейная в широком диапазоне перемещений, что является явным преимуществом по сравнению с предыдущими конструкциями.

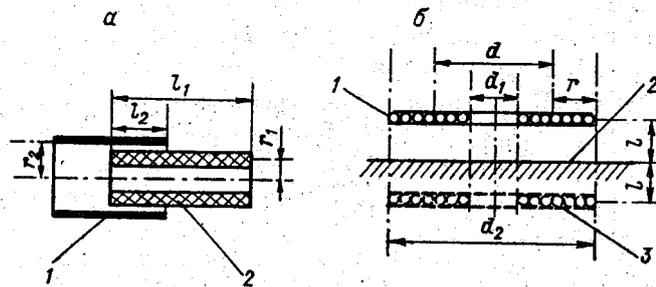


Рис.42. Преобразователи с изменяемыми параметрами поля рассеяния

На рис. 42 б показана конструкция, отличающаяся удобствами использования в сочетании с плоскими перемещающимися металлическими поверхностями, например с центральной частью торцевой поверхности деформируемого стержня. Конструкция содержит плоскую катушку индуктивности l , отстоящую от проводящей поверхности экрана 2 на расстоянии l . При подключении катушки l к источнику переменного напряжения в экране формируются вихревые токи, интенсивность которых обратно пропорциональна l .

Среди индуктивных ИП для задач измерения деформаций льда особый интерес представляет так называемые *магнитоупругие* преобразователи. Принцип их действия основан на том, что механические напряжения в ферромагнитных материалах, например напряжения сжатия, вызывают изменения относительной магнитной проницаемости μ_c и как следствие этого — изменение индуктивности катушки. Важным преимуществом магнитоупругих ИП является то, что при их использовании, например в сочетании с разделительными мембранами (рис. 43), перемещения жесткого центра последних оказываются практически несущественными ввиду больших значений модуля упругости материала ИП ($E \approx 2 \cdot 10^{11}$ Н/м²), а это позволяет значительно снизить требования к разделительным мембранам и не учитывать изменчивость ряда их характеристик (гистерезис, изменения модуля упругости и т. д.), влияющих на результирующую погрешность преобразования. Во-вторых, становится возможным непосредственное вмораживание преобразователя в лед при надежной электрической изоляции намотанной на ИП катушки.

Наиболее целесообразны магнитоупругие ИП с косвенным нагружением. В таких ИП (см. рис. 43) измеряемое давление, воздействуя на разделительную мембрану, преобразуется в силу, действующую на ферромагнитный сердечник. Широко применим вариант конструкции, где направление действия силы совпадает с вектором магнитной индукции в сердечнике, при этом проявляется так называемая продольная магниточувствительность [79]

$$s_{\sigma} = \frac{1}{\epsilon E} \frac{\Delta \mu_c}{\mu_c} = k_{\sigma} \frac{\lambda_n}{B_n^2} \mu_c$$

где $\Delta \mu_c / \mu_c$ — относительное изменение магнитной проницаемости сердечника; $\epsilon = \Delta l / l$ — продольная деформация; E — модуль упругости; k_{σ} — постоянный коэффициент; $\lambda_n = (\Delta l / l)_{B=B_n}$ — магнитострикция при насыщении; B_n — индукция насыщения.

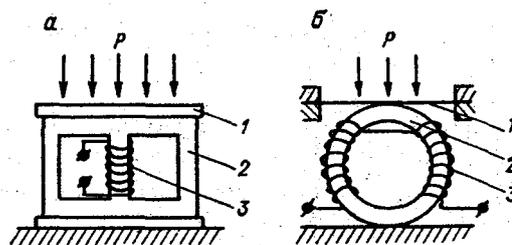


Рис. 43. Магнитоупругие преобразователи

При взаимной перпендикулярности действующей силы и вектора индукции проявляется поперечная магниточувствительность, которая в общем случае не равна продольной, и, что весьма существенно, ее знак не зависит от знака магнитострикции при насыщении.

В реальных конструкциях ИП, как правило, проявляются оба вида магниточувствительности и лишь определенными конструктивными мерами удастся создать преобладание какого-либо одного вида. В частности, на рис. 43 а показан ИП, у которого сердечник набирается из тонких пластин, например сплава К50Ф2 ($s_{\sigma} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{Н}$). При воздействии на мембрану 1 внешнего давления P в сердечнике 2 формируются преимущественно продольные напряжения, которые изменяют значение эффективности магнитной проницаемости и, как следствие этого, индуктивность катушки 3.

Представляет интерес применение ИП с тороидальными ферритовыми сердечниками (см. рис. 43 б). Тип сердечника для таких ИП выбирается из соображений минимальной термочувствительности. В таких ИП мембрана 3 преобразует внешнее давление P в силу, действующую в направлении диаметра сердечника 2. При этом в сердечнике проявляются как продольная, так и поперечная магниточувствительности, связанные довольно сложным образом, однако не создающие взаимной компенсации. Конечно, такие ИП практические не поддаются достаточно корректному расчету, и их характеристики преобразования определяются экспериментально.

Индуктивные ИП давления любого из рассмотренных основных типов на дальнейших этапах преобразования в измерительных установках

могут включаться в различные схемы мостов переменного тока, однако, как отмечалось выше, их несомненным достоинством является возможность использования в схемах измерительных LC генераторов (ЧМ преобразователей). При хорошем конструктивном исполнении преобразователей их добротность оказывается довольно высокой (порядка 10^2), в результате может быть достигнута хорошая точность дальнейшего преобразования в частоту.

Однако в связи с тем, что частота LC генератора в общем случае связана со значениями элементов контура зависимостью вида $f = 0,5\pi^{-1}(LC)^{-1}$, полная функция преобразования оказывается существенно нелинейной. Это требует использования наработанных в других областях измерений методов линеаризации.

В частности, вполне целесообразными оказываются методы, основанные на использовании дополнительного (опорного) генератора, частота которого также нелинейно связана с измеряемой величиной, однако его текущий коэффициент преобразования значительно меньше аналогичного коэффициента в основном (информационном) генераторе. В результате вычитания частот либо деления их друг на друга цифровыми средствами результирующая функция преобразования с хорошим приближением может рассматриваться как линейная. Кроме таких (аналоговых) методов возможно применение цифровых методов линеаризации, и те и другие подробно рассматриваются в работе [79].

3.2.3. Резонансные преобразователи

В качестве резонансных преобразователей деформаций, которые присоединяются к непосредственно вмораживаемому в лед чувствительному элементу, применяются струны, тонкие металлические пластины, цилиндры и пьезокварцевые пластины. Принципиальной особенностью подобных устройств является то, что они обладают весьма большой жесткостью, что позволяет преобразовывать в электрический сигнал непосредственно действующее на ИП усилие (напряжение). Это, в свою очередь, позволяет использовать малогазовые чувствительные элементы, т.е. измерять не деформации льда на некоторой базе (см. п.3.1), а действующие во льду напряжения. Поскольку деформация ИП очень мала и определяется жесткостью преобразователя, то такие недостатки чувствительных элементов, как гистерезис, температурные деформации и т. д., практически теряют значение. Благодаря этому резонансные преобразователи отличаются наиболее высокими метрологическими характеристиками. В частности, относительная погрешность преобразователей с механическими резонаторами обычно составляет $\pm(0,1 \div 0,01) \%$, а при использовании кварцевых резонаторов может быть уменьшена до $10^{-3} \%$ [55].

Струнные преобразователи. В них используется зависимость собственной частоты колебаний натянутой струны от ее длины l , массы m , приложенного усилия F (либо механического напряжения σ)

$$f = 0,5\sqrt{\frac{F}{ml}} = 0,5l^{-1}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = 0,5\sqrt{\frac{E\Delta l}{\rho l^3}}, \quad (114)$$

где ρ — плотность материала струны; E — модуль Юнга; Δl — изменение длины, пропорциональное приложенному усилию.

В принципе натянутые струны, как следует из (114), могут использоваться как преобразователи линейной деформации, однако такой режим их работы не целесообразен. Действительно, в этом случае подлежат преобразованию весьма малые изменения Δl большой величины l и влияние различных дополнительных факторов, например вариаций температуры, существенно сказывается даже при очень малых температурных коэффициентах линейного расширения. В противоположность этому оказывается весьма выгодным режимом преобразования усилия F , при котором выходной величиной являются большие изменения ΔF на фоне очень малых изменений Δl . Во-вторых, при этом весьма ограничены перемещения чувствительного элемента и тем самым практически устраняются погрешности, связанные с этими перемещениями.

Преобразователи выполняются одно- и двухструнными. Важный недостаток однострунного варианта — нелинейность характеристики, которая обуславливает существенно переменное значение погрешности по диапазону измерений. Для них также характерно повышенное влияние элементов всей конструкции (корпуса, мембраны, механизма передачи усилия) на результаты преобразования. В двухструнных преобразователях эти недостатки в значительной степени уменьшены либо полностью устранены.

Возможность линеаризации характеристики преобразования появляется при дифференциальном варианте использования двух струн. Это следует из следующих соображений. Если на струны действуют усилия F_1 и F_2 , то разность квадратов их частот

$$f_1^2 - f_2^2 = \frac{(F_1 - F_2)}{4ml} = \frac{\Delta F_x}{4ml}. \quad (115)$$

Отсюда получается, что разность собственных частот струн

$$\Delta f = \frac{\Delta F_x}{4ml(f_1 + f_2)} \quad (116)$$

оказывается линейной функцией разности сил при условии $(f_1 + f_2) = \text{const}$.

Обеспечение условия $(f_1 + f_2) = \text{const}$ является весьма непростой задачей. Один из вариантов такого обеспечения состоит в использовании методов фазовой автоподстройки по частоте внешнего кварцевого генератора. При этом конструкция преобразователя должна быть снабжена исполнительным механизмом (электромагнитным, тепловым и т. д.), изменяющим натяжение струн в соответствии с сигналом от схемы автоподст-

ройки. Несомненно, что подобный метод может иметь весьма ограниченное применение.

Известен также ряд конструктивных приемов, основанных на выборе длин струн и обеспечении требуемого соотношения их деформаций и позволяющих получать характеристики преобразования, близкие линейным с отклонениями в пределах $0,02 \div 0,1\%$ [79].

Важное значение для струнных преобразователей имеет способ закрепления концов струны, определяющий в значительной степени стабильность характеристики преобразования во времени. Разработано большое количество конструкций устройств закрепления, их анализ позволяет сформулировать следующие основные требования к креплениям.

1. Площадь, на которой крепится струна, должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить возможность надежного крепления.

2. Длина колеблющейся части струны при отклонении ее в обе стороны от положения равновесия должна быть строго одинаковой. В креплениях типа “тисков” (между двумя плоскостями) это может быть обеспечено шлифовкой и полировкой грани, перпендикулярной оси струны.

3. Не допускается изгиб струны в точке выхода из крепления, так как при этом не выполняется предыдущее требование и возникают нежелательные изгибные напряжения в струне.

4. Свойства материала струны не должны значительно отличаться от свойств материала крепления. Крепление более мягким материалом будет “размолото” при колебаниях струны, а более твердый материал приведет к сжатию концов струны.

5. После изготовления любых типов крепления целесообразно подвергать их нескольким циклам температурного старения при $80 \div 100\text{ }^\circ\text{C}$ по 4 — 8 ч для снятия механических напряжений.

6. При закреплении струна должна находиться под рабочим натяжением, которое не должно меняться в момент закрепления.

Возбуждение колебаний в струне может осуществляться с помощью четырех основных типов систем: электромагнитной, магнитоэлектрической, пьезоэлектрической и электростатической (рис. 44).

Электромагнитная система (см. рис. 44 а) содержит приемную 1 и возбуждающую 3 катушки с ферромагнитными сердечниками. Струна 2 также является ферромагнитной. Катушка 1 подключается к входу широкополосного усилителя, а катушка 3 — к его выходу. Для обеспечения колебаний струны в такой системе дополнительно требуется постоянное подмагничивание.

В магнитоэлектрических системах (см. рис. 44 б) возбуждение колебаний обеспечивается за счет взаимодействия поля постоянного магнита 2 и магнитного поля тока, пропускаемого через струну 1. Струна выполняется, как правило, из неферромагнитного материала. Ее колебания в поле магнита 2 приводят к изменениям эквивалентного сопротивления и соответственно к изменениям тока. В схемах автогенераторов струна включа-

ется в четырехплечный резисторный мост, диагональ питания которого подключена к выходу усилителя, а измерительная диагональ — к входу.

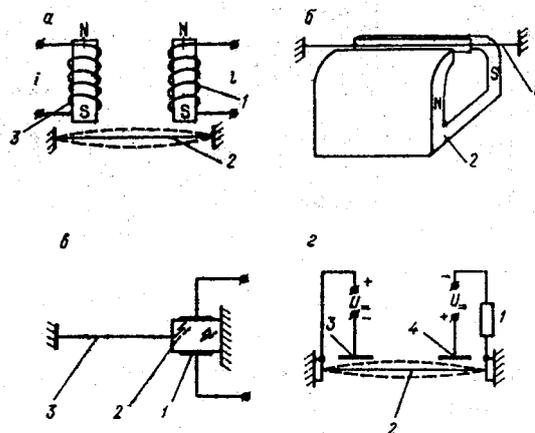


Рис. 44. Схемы возбуждения колебаний струны

Возбуждающая поперечная сила определяется произведением величины индукции $B(x)$ на силу тока в струне i (τ). Для обеспечения наилучших условий колебаний рекомендуется устанавливать длину магнита

$$l_m = (0,7 \div 0,8)l_c,$$

где l_c — длина струны.

Пьезоэлектрические системы (см. рис. 44 в) обеспечивают возбуждение колебаний струны 8 и съем сигнала за счет обратного и прямого пьезоэффектов в пластине 2, к которой крепится струна. При этом возбуждающая сила оказывается приложенной к точке крепления. Возбуждающее напряжение подводится через электроды 1.

Конструкции систем такого типа описаны в литературе, но исследованы мало и редко используются. Можно лишь предполагать, что к упругим свойствам пьезоэлемента здесь должны предъявляться весьма жесткие требования, обусловливаемые принципиальной особенностью системы — наличием колебаний в точке закрепления.

В электростатических системах (см. рис. 44 г) поперечная возбуждающая сила, действующая на струну, создается электрическим полем в зазоре конденсатора, образованного струной 2 и электродом 3. При колебаниях струны изменяется емкость второго из конденсаторов (струна и электрод 4) и соответственно при $U = \text{const}$ изменяется заряд на его обкладках, в цепи резистора 1 возникает переменный ток. Как и в предыдущих системах, возбуждающая и приемная части подключаются соответственно к выходу и входу усилителя, и в такой конструкции возникают автоколебания на резонансной частоте струны.

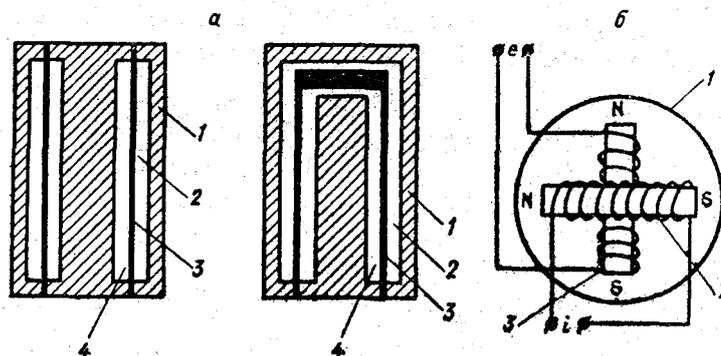


Рис. 45. Конструкции преобразователей с цилиндрическими резонаторами

Особенностью электростатической системы является необходимость использования высоковольтных источников напряжения для возбуждения колебаний.

В преобразователях деформаций применяются как типичные струны (круглого сечения), так и тонкие пластины (плоские струны). Принципиальных различий между методами возбуждения круглых струн и пластин нет. В применении пластин имеются некоторые технологические преимущества. Типичное значение случайной погрешности струнных преобразователей составляет $\pm (0,1—0,2) \%$.

Преобразователи с цилиндрическими резонаторами. Известно, что частота собственных колебаний тонкостенного металлического цилиндра зависит от механических напряжений в его стенках. Применяются два основных типа конструкций, в первой из которых (см. рис. 45 а) стенка цилиндра 3 с обеих сторон жестко закреплена в корпусе 1. Между цилиндром и корпусом имеются две кольцевые полости 2 и 4; в этих полостях находится воздух. При деформировании внешнего корпуса возникают напряжения в стенках цилиндра — они и подлежат преобразованию.

Толщина стенок у цилиндров устанавливается примерно равной 50 мкм. Для того чтобы уменьшить погрешности от влияния узлов крепления, целесообразно снижать отношение $\pi R/L$, где R — радиус цилиндра, L — длина. Значение радиуса обычно ограничивается размерами применяемой системы возбуждения (см. рис. 45 б) и в таком случае имеется лишь возможность оперировать величиной L . Значительному увеличению L препятствуют технологические трудности изготовления столь тонких цилиндров, как указано выше.

Несомненно, что реализация высокой добротности цилиндрического резонатора возможна лишь в том случае, если стенки контактируют газовой средой. Возбуждение колебаний в цилиндре осуществляется с помощью типичной электромагнитной системы (см. рис. 45 б). Внутри цилиндра 1 помещены катушка возбуждения с ферромагнитным сердечником

ком 2 и воспринимающая катушка с сердечником 3. Как и в схемах струнных автогенераторов, катушки 2 и 3 подсоединяются соответственно к выходу и входу усилителя, что обеспечивает режим возбуждения автоколебаний в схеме на собственной частоте цилиндра.

Пьезокварцевые преобразователи. В преобразователях деформаций могут широко использоваться пьезокварцевые пластины, у которых в результате действия нагрузки на обкладках возникает ЭДС. Нагрузка от внешней среды обычно передается через мембрану. Для повышения чувствительности преобразователи содержат зачастую несколько последовательно соединенных пластинок. Выходная ЭДС, как правило, непосредственно не измеряется, а подается на согласующие усилители. Основное требование к усилителям — наличие высокого входного сопротивления (не менее 10^{12} Ом). Дело в том, что пьезокварцевые пластины как источники ЭДС обладают большим внутренним сопротивлением и именно в связи с этим могут использоваться лишь совместно с измерительными устройствами с электрометрическим входом. Несомненно, подобные условия являются препятствием для их широкого использования в рассматриваемых задачах.

Основной недостаток конструкции — соизмеримость внутреннего сопротивления пластин с сопротивлением утечки через крепежные элементы корпуса, которое может варьировать в довольно широких пределах. В связи с этим пьезоэлектрические преобразователи могут использоваться лишь для измерения переменных (в том числе — импульсных) деформаций, периоды которых меньше постоянной времени входной цепи усилителя.

Значительно больший интерес представляет применение пьезокварцевых пластинок в резонансных преобразователях, где такая пластина используется как электрический резонатор. Наиболее существенными достоинствами кварцевых резонаторов являются высокая добротность и слабая зависимость частоты от температуры. Существенный недостаток, к сожалению, такой же, как и у струны, — трудность достаточно качественного крепления пластинки кварца к деформируемому основанию.

В ИП деформаций наиболее целесообразно использовать срезы кварцевого кристалла, имеющие минимальный ТКЧ и возбуждаемые колебаниями сдвига по толщине. Первое обусловлено естественной необходимостью устранить зависимость выходного сигнала от температуры, второе — стремлением избавиться от чувствительности к присоединяемой массе устройств закрепления резонатора.

Как известно [79, 85], наименее термочувствительными являются так называемые косые срезы, когда пластина кварца вырезается из кристалла наклонно по отношению к кристаллографическим осям. Из таких срезов для использования в ИП деформаций наибольший интерес представляет АТ срез. Его температурный коэффициент частоты ТКЧ в диапазоне от -10 до $+50$ °С практически равен нулю. Частотная постоянная для колебаний сдвига по толщине $N = fh = 1770$ кГц·мм. Резонаторы АТ среза могут изготавли-

ваться для диапазона частот от 0,3 до 100 МГц (от 0,3 до 20 МГц на основной частоте и > 20 МГц на нечетных гармониках).

Важной особенностью резонаторов с колебаниями сдвига по толщине является эффект локализации энергии. Сущность эффекта заключается в том, что колебательная энергия возбужденного резонатора концентрируется в центральной области и не распространяется на периферию. В соответствии с этим периферийные области элемента можно жестко закреплять в конструкцию ИП, не ухудшая добротности резонатора. При этом присоединенная масса крепления никак не сказывается на значении резонансной частоты.

Для реализации эффекта локализации возбуждающие электроды наносятся на центральную часть пьезоэлемента (рис. 46), выполненного в виде линзы (*a* — *в*) или прямоугольной пластинки (*з*, *д*). Нагружение осуществляется в плоскости элемента, при этом обеспечивается высокая линейность преобразования усилия *F* либо всесторонне распределенного давления *P* в частоту и реализуется большая жесткость и прочность преобразователя [55]. Конструкция *1* предназначена для преобразователей с сосредоточенным приложением нагрузки, например, через жесткий центр разделительной мембраны. В конструкциях *б* и *г* пьезопластины подвергаются одноосному сжатию рассредоточенной нагрузкой *F*. В конструкции *в* применено всестороннее сжатие пластины, а в конструкции *д* прямоугольная пластина в зажимах *1* и *2* подвергается одноосному растяжению.

Резонаторы рассмотренных типов обладают практически линейной зависимостью относительных изменений резонансной частоты от механического напряжения в центральной области (в пределах изменений σ от нуля до предела прочности на сжатие)

$$\frac{\Delta f}{f} = k_{\sigma} \sigma,$$

где σ — напряжение; k_{σ} — коэффициент.

Частота резонанса для пьезоэлементов с колебаниями сдвига по толщине определяется выражением

$$f_r = 0,5h^{-1} \sqrt{c'_{66}/\rho_k},$$

где c'_{66} — действующая константа упругости, зависящая от угла между кристаллографической *z* осью и плоскостью пьезоэлемента; ρ_k — плотность кварца; *h* — толщина пластины.

В соответствии с этим оказывается справедливой следующая взаимосвязь

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} \approx \frac{\Delta h}{h},$$

т.е. относительные изменения выходного сигнала преобразователя примерно соответствуют относительным изменениям линейных размеров (деформации). Такое же соответствие характерно и для тензорезисторов, но у них выходной величиной является изменение сопротивления, которое измеряется со значительно большими (на 2 — 3 порядка) погрешностями, чем изменение частоты.

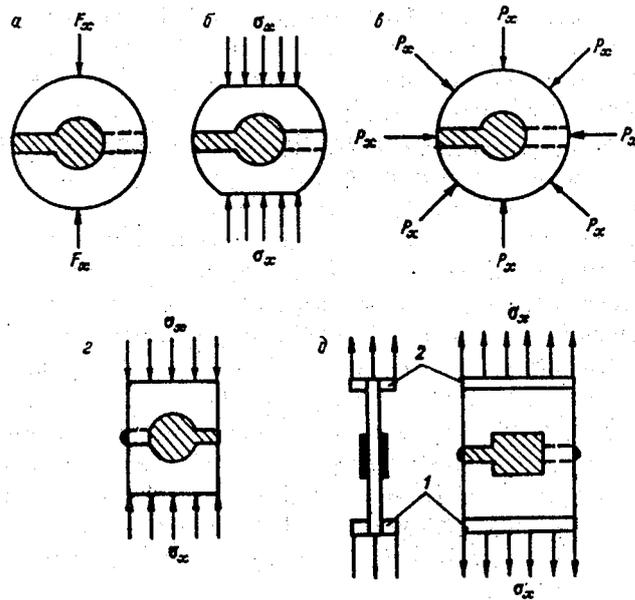


Рис.46. Схемы пьезокварцевых преобразователей с колебаниями сдвига по толщине

Для резонаторов, использующихся в преобразователях, вводится, как и для тензорезисторов, понятие тензочувствительности [55]: k_σ — коэффициент тензочувствительности при одноосном сжатии; k_{\int} — интегральный коэффициент тензочувствительности при всестороннем сжатии в плоскости пьезоэлемента (см. рис. 46 в). Величина k_σ зависит от ориентации кристаллографических осей элемента (азимута нагрузки). Для резонаторов АТ среза азимут нагрузки ψ отсчитывается от оси x , и выражение для коэффициента тензочувствительности при распределенной одноосной нагрузке (см. рис. 46 г) оказывается следующим:

$$k_\sigma(\psi) = 2,75 \cdot 10^{-11} \sin^2 \psi,$$

где коэффициент при $\sin^2 \psi$ имеет размерность Па^{-1} .

При точечном нагружении (см. рис. 46 а)

$$k_\sigma(\psi) = 2,75 \cdot 10^{-11} \left(\sin^2 \psi - \frac{1}{3} \cos^2 \psi \right).$$

При всестороннем нагружении (см. рис. 46 *в*) резонатора АТ среза коэффициент тензочувствительности $k_{\text{н}} = \text{const} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$.

Тензочувствительность в значительной степени зависит от формы используемого пьезоэлемента, и у круглых резонаторов в общем случае выше, чем у резонаторов прямоугольной формы [55].

В высокоточных ИП важное значение имеет зависимость тензочувствительности от температуры. Температурный коэффициент тензочувствительности для резонаторов АТ среза может достигать $(1 \div 2) 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, однако его значение непостоянно и зависит от угла ψ . При $\psi \approx 55^\circ$ значение коэффициента близко нулю.

Кроме резонаторов с колебаниями сдвига по толщине, в ИП целесообразно применение резонаторов с колебаниями изгиба, которые эквивалентны струнным (плоским струнам), но обладают по сравнению с ними более высокой временной стабильностью, а также отсутствием гистерезиса и ползучести. В конструкциях ИП такого типа основную трудность составляет заделка торцов — эта заделка должна осуществляться в узловых точках резонатора, свободных от колебаний. В противном случае происходит значительный отток энергии колебаний к другим узлам конструкции и добротность резонатора резко ухудшается.

Некоторые из применяющихся для измерения деформаций конструкций показаны на рис. 47. В конструкции *а* подвод растягивающих усилий $0,5F$ к резонатору *1* осуществляется посредством стержней *2*, проходящих через узловые точки на расстояниях $0,224L$ от краев резонатора (L — длина резонатора). В резонаторе возбуждаются колебания изгиба по длине-ширине.

В конструкции *б* применена аналогичная схема передачи усилий, при этом вся конструкция выполнена целиком из кварцевой пластины. Однако колебания возбуждаются только в ее центральной области *3*, периферийные области *2* и *4* используются для заделки в ИП. При возбуждении колебаний изгиб области *3* происходит относительно узловых линий *1* — именно по этим линиям и связаны между собой центральная и периферийная области. Возбуждение осуществляется с помощью двух пар электродов (заштрихованные участки), нанесенных по обе стороны области *3*.

Преобразователь *в* выполнен в виде сдвоенного камертона. Колебания в его обоих ветвях *2* и *6* возбуждаются таким образом, чтобы их изгиб в плоскости рисунка обеспечивался в противофазе. Для возбуждения служат четыре пары электродов *1, 3, 5, 7*, напряжения на которые подаются в соответствующем сочетании фаз (сочетания + и – на рисунке). Усилия прилагаются к ножкам *4* и *8*, причем благодаря симметрии конструкции возбуждаемые в ножках колебания оказываются в противофазе и взаимно гасятся. В результате добротность резонатора весьма высокая.

Для всех рассмотренных типов преобразователей характерна зависимость частоты резонанса от механических напряжений σ_x в центральной области

$$f_r = \frac{R_1 h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_k} \left(1 + \frac{R_2 L^2}{E b h^2} \sigma_x \right)}, \quad (117)$$

где E — модуль Юнга кварца; R_1 и R_2 — постоянные коэффициенты, зависящие от способа крепления пьезоэлемента и подвода усилия F_x ; h — толщина элемента; b — ширина; l — длина; ρ_k — плотность кварца.

Причем

$$\sigma_x = \frac{F_x}{bh}$$

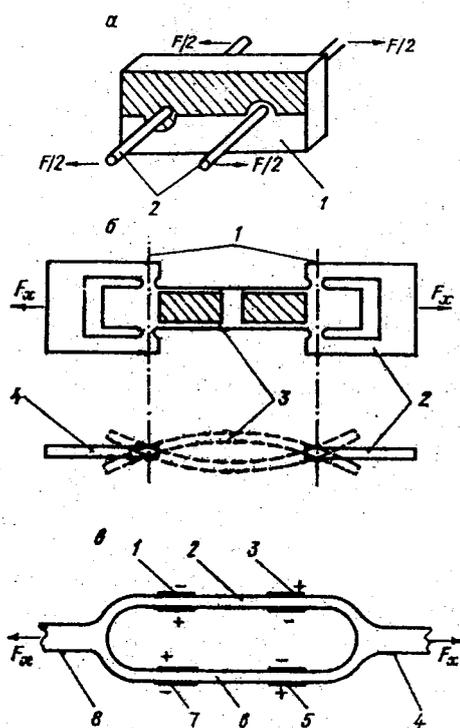


Рис. 47. Пьезокварцевые преобразователи с колебаниями изгиба.

Преобразователи с изгибными колебаниями, несмотря на трудности их закрепления в общей конструкции ИП, выгодно отличаются от преобразователей с колебаниями сдвига по толщине значительно более высокой тензочувствительностью. Различие в тензочувствительности составляет почти два порядка, однако при этом в соответствии с (117) возрастает нелинейность преобразования, которая может достигать $1 \div 10\%$.

ИП на основе пьезокварцевых резонаторов серийно производятся фирмой “Хьюлетт Паккард” (США). Конструкция таких ИП (рис. 48) представляет собой монолитный кристаллический блок 2, содержащий внутри

линзу 1. Блок закрыт герметичными крышками 3 и 4, вырезанными из кристалла кварца таким образом, что их ориентация относительно кристаллографических осей идентична ориентации всего блока 2.

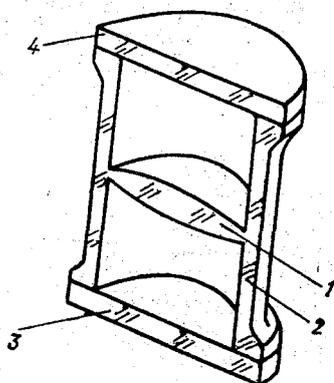


Рис.48. Схема преобразователя фирмы "Хьюлетт Паккард"

Колебания возбуждаются в линзе 1. Начальная частота резонанса 5 МГц, добротность достигает 10^6 . Чувствительность преобразования составляет $2 \cdot 10^{-4}$ Гц / Па. Для снижения температурной погрешности применено двойное термостатирование кварцевого блока, обеспечивающее стабилизацию до $\pm 0,05$ К.

Выпускаемый ИП рекомендуется для измерений гидростатического давления, однако его герметизация и метрологические возможности позволяют без каких-либо значимых модернизаций использовать для измерений механических напряжений во льду.

В целом ИП на основе пьезокварцевых резонаторов благодаря их высоким метрологическим свойствам представляются чрезвычайно перспективными для использования в морских условиях.

3.2.3. Объемные тензопреобразователи

Проволочные резисторы, кроме типичного тензоэффекта, связанного с изменениями линейных размеров при деформации (см. раздел 3.2.1), обладают также объемным тензоэффектом (иногда называемым объемным пьезоэффектом), заключающемся в изменении сопротивления при всестороннем сжатии

$$R_p = R_0(1 + SP),$$

где S — коэффициент объемной тензочувствительности; P — давление (напряжение).

Величина S довольно мала и, например, для марганца составляет $2,5 \cdot 10^{-5}$ МПа⁻¹. В связи с этим объемный тензоэффект резисторов может использоваться лишь для измерения больших напряжений.

В конструкциях преобразователей, основанных на объемном тензоэффекте, очевидно, отпадает необходимость в использовании промежуточных механических чувствительных элементов. Это является их несомненным достоинством. В практических реализациях промежуточные элементы типа сильфонов все же могут использоваться, но не как измерительные, а как защитные, в частности, от агрессивного действия среды. В связи с очень малой чувствительностью проволочные преобразователи на объемном тензоэффекте применяются весьма редко.

Большой объемной тензочувствительностью обладают угольные резисторы. Известно использование таких резисторов для измерения давлений (напряжений) в диапазоне $0,7 \div 7,0$ МПа. Чувствительность преобразования составляла $1,4 \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ при вполне удовлетворительных линейности и гистерезисе.

Значительной объемной тензочувствительностью характеризуются полупроводниковые материалы, в частности, полупроводниковые резисторы, диоды, транзисторы, туннельные диоды. Однако возможности их применения практически не исследованы.

Кроме объемного тензоэффекта, в преобразователях деформаций целесообразно использовать объемный магнитоупругий эффект, заключающийся в изменении магнитной проницаемости ферромагнитных материалов при всестороннем погружении [28, 86].

Известны преобразователи типа ДДМ 1, предназначенные для измерения давлений (напряжений) в диапазоне до 10 МПа. Погрешность преобразователей с учетом гистерезиса не превышает ± 2 %. Температурная погрешность в диапазоне не превышает $0,1$ %/К. Преобразователи выполнены в виде цилиндрических магнитопроводов из стали 38 ХМЮА, имеющих возбуждающую и измерительную катушки, расположенные в специальных полостях. Измеряемое давление среды подается на магнитопровод через масляный разделитель.

Высокой объемной магнитоупругой чувствительностью обладают серийные ферриты, например ферритовые сердечники типа 1500 НМ. При их использовании необходимо изолировать внутреннюю полость, чтобы избежать появления замкнутого проводящего витка. Метрологические характеристики подобных преобразователей практически не исследованы.

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОДВИЖЕК МОРСКИХ ЛЬДОВ

4.1 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОДВИЖЕК ПРИПАЙНОГО ЛЬДА

Припайный ледяной покров в задачах изучения подвижек характерен, прежде всего, тем, что он находится на упругом основании — слое воды, а при подвижках развивает усилия, намного превышающие возможности каких-либо жестких измерительных конструкций, например, устанавливаемых на свайных основаниях. Между тем, при измерениях необходима надежная привязка к фиксированной точке, и именно эта необходимость обуславливает трудности разработки специальных приборов для контактных измерений.

Одна из первых работ, где выполнялись экспериментальные исследования подвижек припайного льда [68], опиралась на модернизированные варианты использования типичных самописцев уровня моря (СУМ), которые устанавливались на опорной раме над лункой во льду. Через шкив СУМа проходил трос, который одним концом крепился к якорю, а на втором — имел противовес. В такой конструкции СУМ регистрирует перемещения относительно якоря, а поскольку якорь неподвижен, то эти перемещения адекватны подвижкам льда. В частности, подобная конструкция СУМа используется в ААНИИ (ледовый мареограф), где, однако, механический самописец заменен на конструкцию с электрическим измерительным преобразователем.

Однако, как уже рассматривалось ранее, припайный лед может перемещаться как по вертикали (из-за колебаний уровня воды), так и по горизонтали (из-за течений, ветра, термических факторов и т.д.). Для отделения вертикальных перемещений от горизонтальных в работе [68] использовались две синхронно работающих установки. Одна располагалась вблизи берега, а вторая — в открытой части припая. При анализе результатов вертикальные перемещения льда считались одинаковыми для обеих точек расположения установок. В то же время горизонтальные перемещения вблизи берега считались отсутствующими. Это позволяло путем обработки синхронных записей выделять горизонтальные подвижки в открытой части припая. Несомненно, что оба отмеченных предположения выполняются далеко не всегда.

Наиболее целесообразно производить измерения все же в одной точке, разделяя виды подвижек какими-либо иными приемами. Такой метод измерений предложен в работе [3]. В этом методе в припайном льду /

(рис. 49) выполняется лунка 2, над которой устанавливается опорная рама 3. С закрепленным на этой раме шкивом 4 связан измерительный блок 5. Через шкив 4 пропущен трос 6, связывающий якорь 7, установленный на грунте 8, с противовесом 9. На удалении от лунки 2 в направлении нормали к береговой черте N выполнена дополнительная лунка 10, над которой установлена аналогичная конструкция с опорной рамой 11, шкивом 12 и измерительным блоком 13. От якоря 7 через шкив 12 пропущена линия дополнительного троса 14 с противовесом 15. Расстояние L между лунками задается равным примерно удвоенной глубине места H .

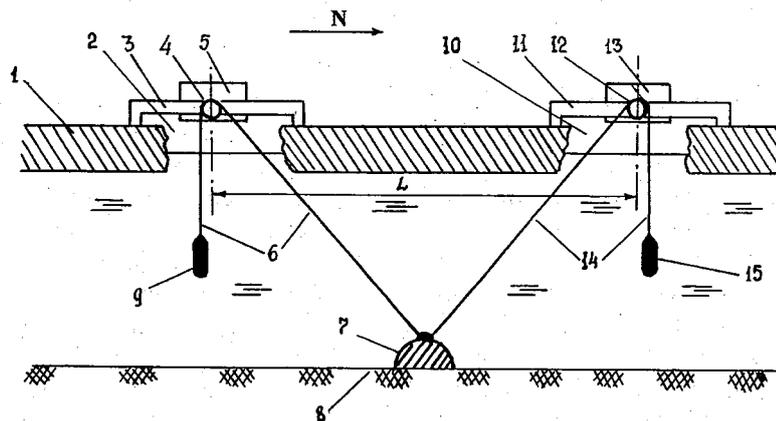


Рис. 49. Схема установки для раздельного измерения горизонтальных и вертикальных подвижек припайного льда

При вертикальных подвижках льда тросы 6 и 14, оставаясь натянутыми за счет действия противовесов, приводят к противоположным по направлению поворотам шкивов 4 и 12. Эти повороты регистрируются в блоках 5 и 13 как величины, имеющие разные знаки отклонений от исходного (нулевого) значения. При центральной установке якоря 7 эти отклонения составляют

$$\Delta\gamma_n(H) = -\Delta\gamma_l(H) = \frac{\Delta H \sin\alpha}{R}, \quad (118)$$

где $\Delta\gamma_n(H)$ — изменение углового положения правого шкива (в радианах); $\Delta\gamma_l(H)$ — изменение углового положения левого шкива (аналогично — в радианах); ΔH — изменение уровня (вертикальные перемещения ледяного покрова); R — радиус шкива; α — угол наклона тросов 6 и 14 относительно горизонтали. Суммирование отклонений с учетом знаков дает результат, соответствующий исходному значению.

Как следует из выражения (118) радиус шкива R должен задаваться таким, чтобы при максимальных вертикальных перемещениях ледяного

покрова $\Delta H = \max$ значения $\Delta \gamma_n(H)$ и соответственно — $\Delta \gamma_l(H)$, не превысили 2π радиан.

При горизонтальных подвижках в направлении N лунки 2 и 10 вместе с рамами смещаются относительно точки расположения якоря 7, при этом шкивы 4 и 12 поворачиваются в одном и том же направлении. В этом случае зарегистрированные в блоках 5 и 13 величины оказываются одинаковыми по знаку и их суммирование дает результат, пропорциональный перемещению.

Изменения углового положения шкивов для этой ситуации могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta \gamma_n(H) = \Delta \gamma_l(L) = \frac{\Delta L \cos \alpha}{R}, \quad (119)$$

где ΔL — горизонтальное перемещение льда в направлении вектора N .

Из выражения (119) следует аналогичное предыдущему условие выбора радиуса шкивов, т.е. чтобы изменение углового положения шкивов при максимально возможных горизонтальных перемещениях льда не превышало 2π радиан. Естественно, чтобы выполнялись оба условия, радиусы шкивов задается соответствующими большему из полученных значений.

В общем случае, при наличии обоих видов подвижек суммирование величин в блоках 5 и 13 дает информацию о горизонтальных подвижках, а их вычитание с учетом знаков — информацию о вертикальных подвижках. Причем условие центрального расположения якоря 7 с достаточной для практических целей точностью, как правило, выполняется всегда, поскольку смещения существенно меньше глубины места.

Из приведенных выражений также следует, что путем выбора соотношения между L и H можно задавать различную чувствительность к вертикальным и горизонтальным подвижкам. Действительно, равная чувствительность получается лишь при $\alpha = 45^\circ$. Уменьшение угла α приводит к снижению чувствительности к вертикальным и повышению чувствительности к горизонтальным подвижкам.

Технология размещения на припайном льду описанной измерительной установки требует некоторых специальных приемов. Во-первых, необходимо, чтобы якорь был расположен посередине между лунками 2 и 10, во-вторых, от этого якоря к лункам должны идти наклонные участки тросов 6 и 14. Несомненно, что подобная работа может быть выполнена с использованием легкоодолазного снаряжения, однако это не всегда возможно.

Для размещения всех узлов установки без применения легкоодолазных работ между основными лунками 1 и 2 (рис. 50), над которыми закреплены рамы с измерительными блоками 3 и 4 соответственно прорезаются технологические каналы 5 и 6 и центральная лунка 7. Монтаж всей измерительной установки производится на поверхности ледяного покрова, а затем якорь с помощью лебедки и отрезка дополнительного (технологического) троса опускается на дно через центральную лунку 5.

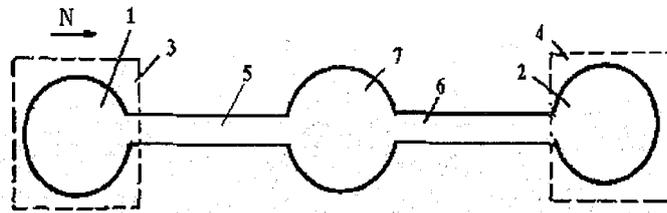


Рис. 50. Схема размещения измерительной установки на ледяном покрове для регистрации подвижек в фиксированном направлении вектора N

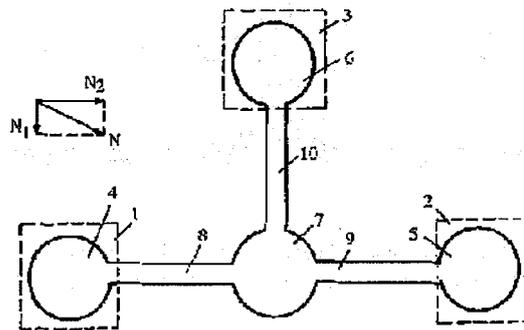


Рис. 51. Размещение на льду конструкции с тремя измерительными блоками при регистрации подвижек с произвольной ориентацией вектора N

Для условий, когда направление горизонтальных подвижек отличается от вектора N либо изменчиво во времени относительно этого вектора, целесообразно устанавливать три идентичных измерительных блока 1, 2 и 3 (рис. 51) над лунками 4, 5 и 6 при расположении якоря под центральной лункой 7 [5]. Через лунку 7 якорь устанавливается на дно, как и в предыдущем случае, с помощью дополнительной лебедки, а через технологические каналы 8, 9 и 10, прорезанные во льду, проводятся наклонные участки линий тросов к измерительным блокам.

При таком расположении появляется возможность отдельной регистрации составляющих N_1 и N_2 реального вектора горизонтальных подвижек N . Действительно, под воздействием составляющей N_2 формируются одинаковые по знаку сигналы в измерительных блоках 1 и 2, в то же время ее влияние на сигнал в блоке 3 практически несущественно из-за пропорциональности этого сигнала изменчивости $\Delta \sin(90 \pm \alpha)$, где α — угол отклонения плоскости линии троса блока 3 относительно ее исходного положения. Под воздействием составляющей N_1 формируется сигнал в блоке 3, а ее влияние на сигналы в блоках 1 и 2 по аналогии с предыдущим также несущественно. Таким образом, по результатам, зарегистрированным в блоках 1, 2 и 3, легко определяются ортогональные составляющие N_1 и N_2 и соответственно вектор N . При наличии только вертикальных подвижек

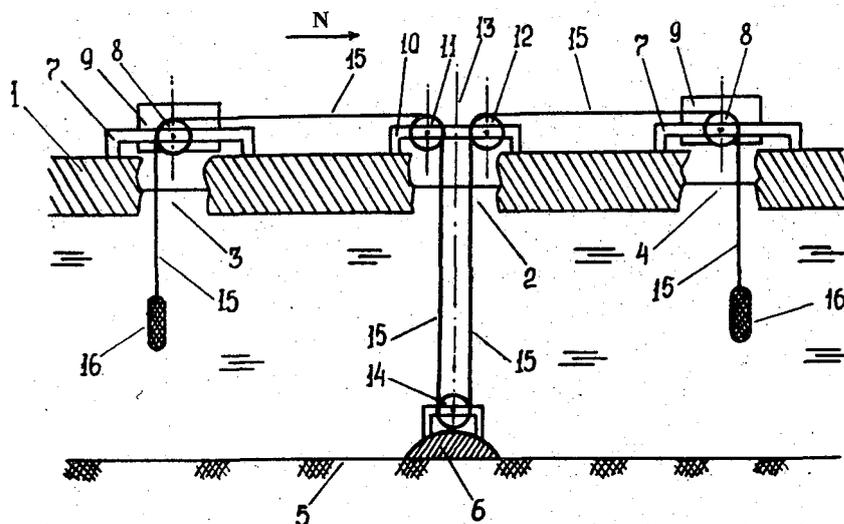


Рис. 52. Конструкция измерительной установки, не требующая прорезания соединительных каналов во льду

в блоках формируются равные по модулю сигналы, отражающие одинаковые “удлинения” соответствующих тросов. При совокупном действии горизонтальных и вертикальных подвижек рассмотренные особенности легко позволяют путем обработки сигналов разделять виды подвижек и выявлять фактическое положение вектора N и его значение.

Определенным недостатком обеих конструкций является трудность их установки в реальных условиях, поскольку необходимо выполнение соединительных каналов между лунками. Длина каждого канала, как уже отмечалось выше, должна примерно быть равной глубине места (в этом случае обеспечиваются одинаковые чувствительности к горизонтальным и вертикальным подвижкам). Каналы преимущественно выполняются вручную, поскольку возможность применения ледорезных машин, как правило, отсутствует.

В конструкции, предложенной в работе [6] и показанной на рис. 52, наклонные участки тросов отсутствуют и это позволяет избежать необходимости прорезания каналов.

В этой конструкции во льду 1 прорезается центральная лунка 2 и по обе стороны от нее — боковые лунки 3 и 4. Под центральной лункой на грунте 5 устанавливается якорь 6. Над боковыми лунками 3 и 4 устанавливаются идентичные измерительные блоки, каждый из которых выполнен в виде опорной рамы 7, на которой расположены измерительный шкив 8 и связанный с ним отсчетный узел 9. Над центральной лункой 2 установлена дополнительная опорная рама 10, в которой размещены установочные

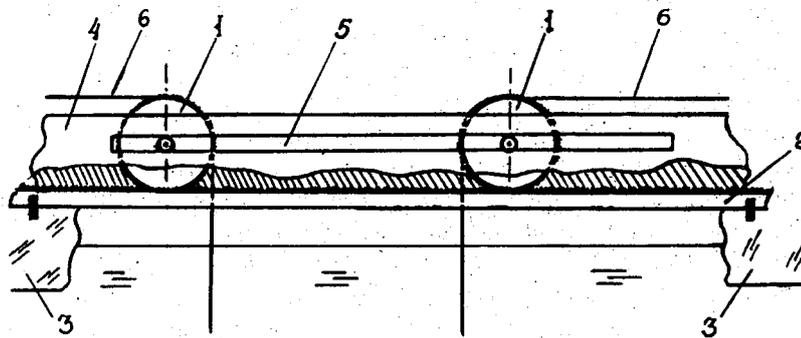


Рис. 53. Конструкция узла шкивов над центральной лункой, обеспечивающая повышение надежности

шкивы 11 и 12 симметрично относительно оси 13 лунки 2. На якоре 6 расположен третий установочный шкив 14. Диаметры измерительных и установочных шкивов задаются одинаковыми. По системе шкивов проходит трос 15, не имеющий жесткого скрепления с якорем 6. На концах троса со стороны измерительных шкивов 8 установлены противовесы 16 с одинаковой массой.

Поскольку под действием противовесов трос постоянно натянут, то он эквивалентен жесткой поверхности. При подвижках льда одновременно перемещаются оси шкивов 8, 11 и 12. В результате их взаимодействия с тросом обеспечиваются его перемещения относительно исходного состояния. При этом жесткость троса остается постоянной, а изменяется лишь высотное положение противовесов 16. Для того, чтобы возникающий при этом момент сил не приводил к возврату троса и соответственно — шкивов в исходное положение, задаются требования к массам противовесов и к величине моментов сил трения шкивов: суммарная величина моментов сил трения должна превышать момент сил от различий высотного положения противовесов.

Синхронные перемещения шкивов при подвижках льда и сохранение жесткости троса позволяют получать в измерительных блоках такие же виды сигналов, как и в конструкции на рис. 49, при этом обеспечивается не меньшая, чем там, чувствительность.

Для повышения надежности функционирования устройства за счет снижения зависимости от моментов сил трения шкивов целесообразно снабдить шкивы над центральной лункой соосными дисками 1 (рис. 53) такого же диаметра, как шкивы. Поверхность дисков по ободу должна быть шероховатой либо зубчатой. Этой поверхностью диски прижимаются к планке 2, входящей в конструкцию опорной рамы и соответственно скрепленной со льдом 3. Планка со стороны дисков имеет аналогичную им поверхность. Общие оси каждого шкива с диском не закреплены в опорной раме 1, а могут свободно перемещаться по прорези 5, параллельной планке 2.

При горизонтальных подвижках льда 3 планка 2 перемещается вместе со льдом, обеспечивая вследствие сцепления с дисками их повороты с одновременным перемещением по прорези 5 с сохранением расстояния между осями. Повороты дисков приводят к вынужденному движению троса б и к соответствующим поворотам шкивов в измерительных блоках устройства. При вертикальных подвижках планка 2, естественно, остается в исходном положении, но диски 1 под действием натяжения троса перемещаются по ней с изменением расстояния между осями.

Направления поворотов дисков при различных видах подвижек таковы же, как и в предыдущем варианте конструкции. Тем самым обеспечивается надежная раздельная регистрация этих подвижек. Для измерений произвольного вектора подвижек, очевидно, достаточно в одном месте расположить два рассмотренных устройства во взаимно перпендикулярных направлениях.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖЕК ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ

Под подвижками дрейфующих льдов обычно понимают не их дрейф (генеральное перемещение), а изменения конфигурации совокупности ледяных полей — *деформации ледяного покрова* [53]. В литературе иногда вместо терминов *подвижки* и *деформации ледяного покрова* используют термин *деформации льда*, что, видимо, неправомерно, особенно с позиций измерительных задач. Деформации ледяного покрова возникают преимущественно в результате *локальных особенностей* дрейфа, а также — торошения, подсонов, наслоения льда и т.д. При этом характер и интенсивность деформаций ледяного покрова, кроме основных причин (ветер, течения и др.), зависят от сплоченности льда, его торосистости и т.д. Для регистрации деформаций ледяного покрова необходимы некоторые специальные приемы получения информации особенно специальные приемы ее обработки [53, 54, 100, 105, 106].

В Японии [109] разработан радиолокационный метод получения такой информации с больших акваторий. При его реализации использовалась сеть радарных станций на побережье о-ва Хоккайдо. Движение и деформации ледяного покрова определялись по перемещениям отмеченных радарными полынй. По результатам измерений вычислялись с помощью триангуляции напряжения в ледяном покрове, т.е. метод по своей сущности является косвенным и соответственно обладает весьма значительными погрешностями. Однако эти погрешности в работе [109] в полном виде не оценивались.

Как известно, радиолокационная съемка распределения ледяных полей на акватории применяется также с самолетов ледовой авиаразведки, на которых установлены радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО). В работе [54] рассматривается метод оценки деформаций ледяного покрова по данным РЛС БО. Для этого картирование дрейфующих льдов производится со смещением во времени на 20—30 ч по одной и той

же маршрутной сетке. При картировании выделяются характерные ледовые образования, например, ледяные поля с торосами и регистрируются изменения их расположения за период времени между съемками. По этим данным судят о деформациях ледяного покрова, а также о наличии и интенсивности сжатий.

Чтобы составить такое суждение, требуется весьма трудоемкая обработка. По полученным данным составляются карты векторов дрейфа и изолиний скорости дрейфа. Пример такой карты показан на рис. 54. Путем сопоставления карт выделяются зоны вероятных сжатий и разрежений. Принцип выделения состоит в следующем.

Если направление векторов дрейфа приближается к нормали или нормально к изолиниям скоростей, а градиент по направлению потока уменьшается, то в этих зонах присутствует сжатие. Увеличение градиентов в направлении потока соответствует зоне разрежения. Если направление векторов приближается к изолиниям скорости дрейфа, то считаются наиболее вероятными сдвиговые деформации и образование цепочек разводий и каналов, т.е. метод позволяет не только фиксировать фактическую ситуацию, но также прогнозировать ее развитие.

Для более детальных оценок деформаций дрейфующего ледяного покрова на картах радиолокационных съемок определяется положение системы контурных точек, расположенных в узлах регулярной квадратной сетки. Затем измеряются относительные изменения площадей каждого четырехугольника за интервал времени между съемками, а полученные результаты, например, выраженные в процентах изменения, наносятся на карту. Причем, если произошло увеличение площади, то значению относительной деформации присваивается знак + и наоборот при уменьшении — знак —. Значения соотносятся к серединам четырехугольников, затем по этим значениям строятся изолинии деформаций.

В приводимом ниже примере карты деформаций (рис.55), полученной по рассмотренной методике и заимствованной из работы [54], наглядно видна сильная пространственная неоднородность поля. При этом отчетливо выделяются основные особенности напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, что дает возможность устанавливать наиболее целесообразные маршруты движения судов.

Более качественная оценка может быть осуществлена путем расчета эллипсов деформаций. При этом учитывается скорость дивергенции льдин в вершинах четырехугольников, их угловая деформация и неравномерность линейной деформации по ортогональным составляющим. Большая ось получаемого при расчетах эллипса определяет направление, по которому происходит наибольшее растяжение или наименьшее сжатие, а малая ось — соответственно наоборот (см. рис.55).

Несомненно, что рассмотренный метод представляет очень большой интерес при планировании транспортных операций и выборе стратегии ледокольной проводки судов. Что касается проблем тактики плавания во

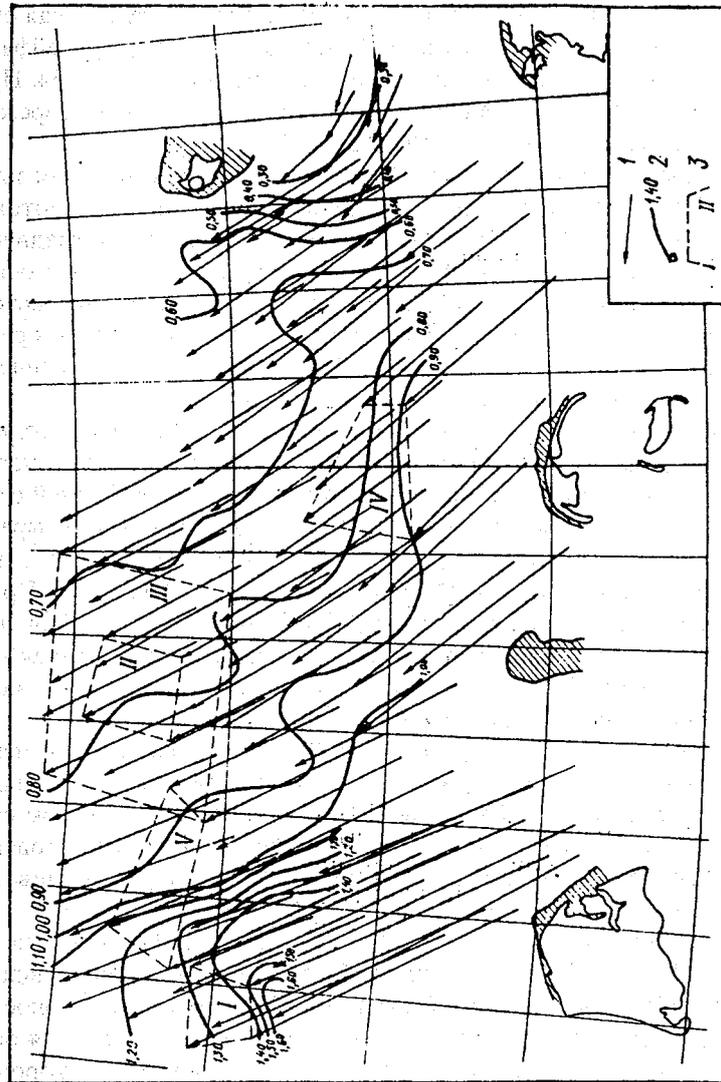


Рис. 54. Динамическая карта льдов из работы [54]: 1 — векторы дрейфа в масштабе карты; 2 — изолинии скорости дрейфа, км/ч; 3 — контуры четырех угольников, для которых определялись эллипсы деформации

льдах, то, к сожалению, оперативность и подробность информации, получаемой с помощью этого метода, явно недостаточны.

Рассмотрим погрешности метода. Как известно, в РЛС БО используется принцип непрерывного активного сканирования (качение луча) по нормали к направлению полета авиасредства. Излучение и прием импульсов производятся в сантиметровом диапазоне радиоволн. Ширина зоны обзора выбирается оператором. В наиболее распространенной системе РЛС БО (“Торос”) эта ширина может задаваться как ± 15 км или ± 30 км.

Ограничение оперативных возможностей метода преимущественно связано с отмеченными техническими возможностями РЛС БО. Требуемый в методе сдвиг во времени между съемками в 20—30 ч преимущественно обусловлен тем, что за это время характерные ледовые образования должны сместиться на расстояния, превышающие пределы допустимой погрешности по определению этих расстояний. В частности, в работе [54] погрешность географической привязки изображений при наличии береговых ориентиров, например, через 50—60 км по маршруту, оценивается ± 1 км. С увеличением длины галсов маршрутной сетки погрешность, естественно, возрастает.

Более современные методы навигационных определений местоположения авиасредства имеют значительно меньшие погрешности. По оценкам работы [53] — порядка $\pm 0,07$ км (спутниковые системы). Несомненно, что подобное снижение погрешности очень перспективно. Это может дать существенное повышение оперативности и качества получаемых данных о деформациях ледяного покрова. При этом процесс обработки результатов повторных съемок достаточно легко автоматизируется. Современные возможности компьютерной обработки позволяют запоминать РЛ изображения, привязывая их к сетке географических координат, сравнивать их между собой и выполнять все требуемые расчеты поля деформаций.

Возможности реализации принципа повторных радиолокационных съемок с их последующей специальной обработкой для определения характеристик деформаций ледяного покрова не ограничиваются авиасредствами ледовой разведки. Перспективно использование этого принципа при анализе данных ИСЗ. В частности, в работе [112] сообщается об использовании информации ИСЗ, содержащих РЛС. Рассматриваются две методики автоматизированного анализа последовательных РЛ изображений, позволяющие определять поля скорости движения льда и деформаций ледяного покрова. Каждая из методик опробывалась на парах изображений, полученных с ИСЗ “*Seasat*”. Результаты хорошо согласуются друг с другом и с данными ручной обработки изображений. На современных ИСЗ используются РЛС с синтезированной апертурой. Наблюдения возможны через облачность и в ночное время. Таким образом, с применением космических РЛС возможности метода повторных РЛ съемок существенно возрастают.

Кроме радиолокационных изображений аппаратура, устанавливаемая на современных ИСЗ, дает возможность получать изображения по-

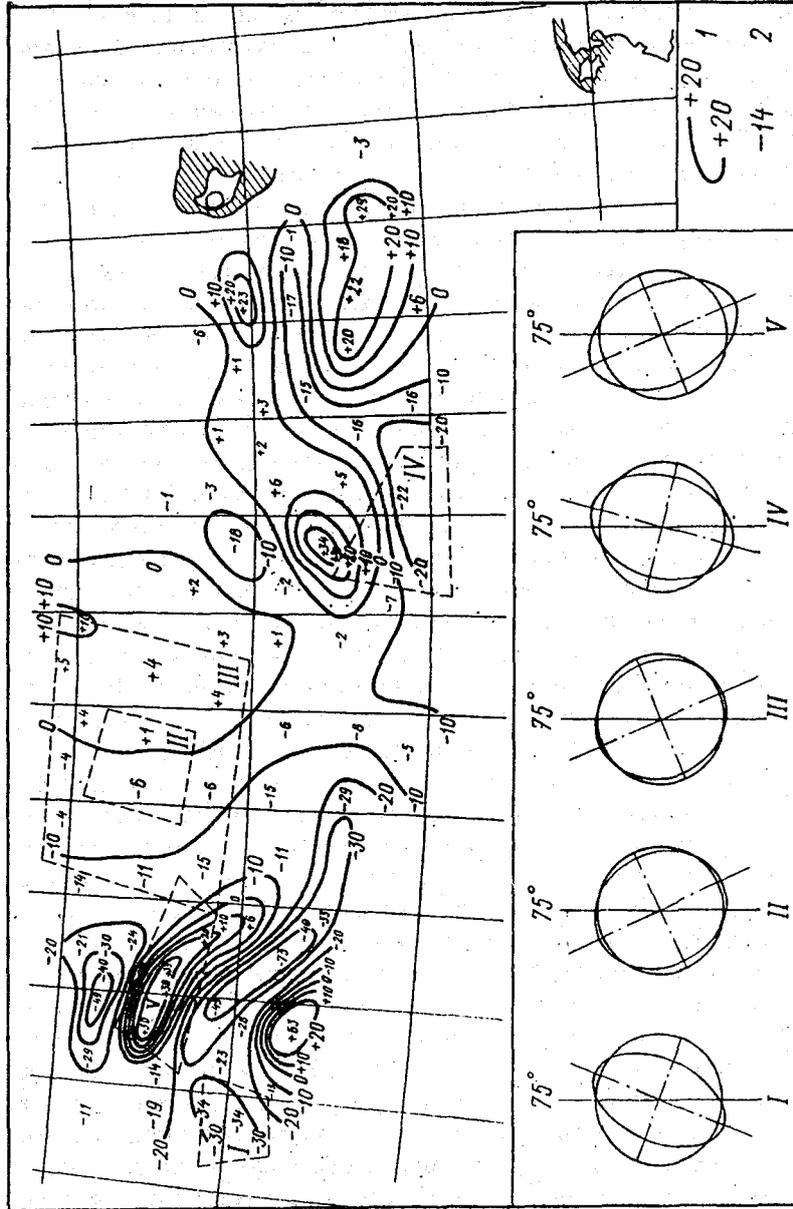


Рис. 55. Карта деформаций ледяного покрова из работы [54] (на врезке эллипсы деформаций в произвольном масштабе):
 I — изолинии деформации; 2 — значения деформаций площадей четырехугольников

верхности в оптическом, инфракрасном и СВЧ диапазонах. В каждом из этих диапазонов на получаемых изображениях ледяной покров уверенно выделяется на фоне воды. Это предполагает возможность такой же обработки последовательных изображений, как и при РЛ съемке, и получение характеристик деформаций ледяного покрова. Это действительно так. Довольно подробный анализ таких возможностей был выполнен в работе [63]. К сожалению, выводы получились не очень утешительными. Основные причины сравнительно низкой перспективности отмеченных диапазонов состоят в следующем.

Ледовая информация, получаемая в оптическом и ИК диапазонах, очень сильно зависит от облачности. Изображения облаков на снимках просто маскируют находящиеся под ними ледовые объекты. Даже тонкая (просвечивающая) облачность искажает распределение ледяных полей. В результате качественную информацию в указанных диапазонах можно получать сравнительно редко. По оценкам, сделанным в работе [63], в Арктике в светлое время года ее можно получать 1 раз в 3—5 суток, а в антарктических морях — 1 раз в 8—10 суток. Естественно, что столь большая дискретность может позволить лишь определять характеристики генерального дрейфа, но не деформации ледяного покрова в том смысле, как они рассматриваются здесь.

Значительно большая независимость от метеорологических условий по сравнению с оптическим и ИК диапазонами характерна для пассивных микроволновых (СВЧ) методов. Микроволновые радиометры устанавливаются на некоторых типах ИСЗ и позволяют регистрировать так называемую радиояркостную температуру объектов. Однако, как отмечается в работе [63], у них слишком низка пространственная разрешающая способность, которая составляет порядка 20—30 км, что также сильно ограничивает возможности их применения для определения характеристик деформаций ледяного покрова.

Кроме самолетных и спутниковых методов в натуральных условиях применяются некоторые наземные методы. В работе [53] описан *теодолитный* метод, применявшийся на станциях “Северный полюс” и показавший хорошие результаты. Сущность метода состоит в следующем. На некоторой базовой льдине в двух фиксированных точках размещаются теодолиты. На льдинах, окружающих базовую, размещаются по две вехи. При известном положении теодолитной базы пеленгование вех позволяет определять их смещения относительно базы. При этом выделяются как *поступательные*, так и *вращательные* подвижки изучаемых льдин [53].

Погрешность определений в методе существенно зависит от размеров теодолитной базы. Несомненно также, что с увеличением расстояния между базовой льдиной и изучаемыми льдинами погрешность сильно возрастает. Считается, что в условиях хорошей видимости метод может применяться для определений характеристик подвижек на удалении до 10 км [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 1104457, СССР. МКИ G 01 V 3/12. Способ ледовой разведки//И.А.Степанюк, Ю.М.Бацких. —№ 3556213/18-25. —Заявл. 10.01.83. —Опубл. 23.07.84. —Бюл. изобр. СССР, 1984, № 27.
2. А.с. № 1167133, СССР. МКИ В 65 G 67/60. Устройство для выгрузки транспортных судов (его варианты)/А.И.Плугин, Ю.М.Бацких, И.А.Степанюк. —№ 3699704/27-11 и 3699705/27-11. —Заявл. 20.02.84. —Опубл. 15.07.85. —Бюл.изобр. СССР, 1985, № 26.
3. А.с. № 1249300, СССР. МКИ G 01 B 5/00. Устройство для измерения подвижек припайного льда водоема/И.А.Степанюк. —№ 3847614/25-28. —Заявл. 16.01.85. —Опубл. 07.08.86. —Бюл. изобр. СССР, 1986, № 29.
4. А.с. № 1295234, СССР. МКИ G 01 F 23/26. Устройство для измерения параметров ледяного покрова (его варианты)/И.А.Степанюк. —№ 3830937/24-10. —Заявл. 25.12.84. —Бюл. изобр. СССР, 1987, № 9.
5. А.с. № 1430722, СССР. МКИ G 01 B 5/00. Устройство для измерения подвижек припайного льда водоема/И.А.Степанюк. —№ 4214959/25-28. —Заявл. 26.01.87. —Опубл. 15.10.88. —Бюл. изобр. СССР, 1988, № 38.
6. А.с. № 1476302, СССР. МКИ G 01 B 5/00. Устройство для измерения подвижек припайного льда на поверхности водоема/И.А. Степанюк. —№ 4247590/25-28. —Заявл. 19.05.87. —Опубл. 30.04.89. —Бюл. изобр. СССР, 1989, № 16.
7. *Бабич Н.Г., Бацких Ю.М.* Выгрузка грузов в районах Крайнего Севера через припай/Сер. "Морские порты", вып. 3 (463). —М.: Изд-во ЦБНТИ ММФ, 1981. —14 с.
8. *Бацких Ю.М., Бурков Г.Д.* Рекомендации по проведению грузовых операций в припайных льдах Арктики. —М.: Изд-во В/О Мортехинформреклама, 1986. —40 с.
9. *Беззубик О.Н.* Поперечная чувствительность полупроводниковых тензорезисторов//Тр. ЛИАП. —1968. —Вып 58. —С. 41—46.
10. *Берри Б.Л., Григоров Н.О., Качурин Л.Г., Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А.* Электромагнитные процессы при кристаллизации воды и разрушении льда//Проблемы инженерной гляциологии. —Новосибирск: Наука, 1986. —С. 24—32.
11. *Богородский А.В. и др.* Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. —Л.: Гидрометеиздат, 1984. —264 с.
12. *Богородский В.В.* Радиозондирование льда. —Л.: Гидрометеиздат, 1975. —64 с.
13. *Богородский В.В.* Физико-технические проблемы исследований морского льда Механика и физика льда. —М.: Наука, 1983. —С.29—37.
14. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. —Л.: Гидрометеиздат, 1980. —384 с.
15. *Богородский В.В., Смирнов В.Н.* Релаксационные процессы в ледяных полях Арктики//Докл. АН СССР. —1980. —Т.250, № 3. —С. 589—592.
16. *Богородский В.В., Гаврило В.П., Иванов И.П.* О применении доплеровского эффекта в оптических квантовых генераторах для исследования напряженного состояния льда//Тр. ААНИИ. —1974. —Т.324. —С.114—117.
17. *Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А.* Разрушение льда. —Л.: Гидрометеиздат, 1983. —232 с.

18. *Богородский В.В. и др.* Оценка возможного применения радиосейсмоакустического метода для исследования крупномасштабных деформаций ледяного покрова//Изв. АН СССР./Океанология. —1980. —Т. 20, № 4. —С. 619—624.
19. *Богородский В.В. и др.* Синхронные измерения инфранизкочастотных акустических и электромагнитных полей в морской воде//Тр. ААНИИ. —1980. —Т. 374. —С. 80—86.
20. *Богородский В.В. и др.* Структура естественного СНЧ электромагнитного поля Земли в Арктическом бассейне//Геомagnetизм и аэрономия. —1981. —Т.21, № 4. —С. 709—714.
21. *Бородачев В.Е.* Некоторые особенности распределения льдов в арктических морях летом и их влияние на скорость движения судов//Тр. ААНИИ. —1974. —Т.316. —С. 35—41.
22. *Бузуев А.Я.* Перспективный путь совершенствования научно-оперативного обеспечения судоходства во льдах//Тр. ААНИИ. —1988. —Т. 401. —С. 130—141.
23. *Бушуев А.В., Волков Н.А., Лоцилов В.С.* Атлас ледовых образований. —Л.: Гидрометеиздат, 1974. —139 с.
24. *Ваганов В.И.* Интегральные тензопреобразователи. —М.: Энергоатомиздат, 1983. —137 с.
25. *Воеводин В.А.* Особенности ветрового сжатия льда в Северном Ледовитом океане//Тр. ААНИИ. —1978. —Т.354. —С.97—107.
26. *Воробьев А.А.* Физические условия залегания глубинного вещества. —Томск: Изд-во ТГУ, 1975. —230 с.
27. *Воробьев А.А. и др.* Электромагнитное излучение в диапазоне радиочастот при механическом разрушении льда//ТПИ. —Томск, 1978. —6 с. —Деп. ВИНТИ № 437-78 деп.
28. *Гинзбург В.В.* Магнитоупругие датчики. —М.: Энергия, 1970. —70 с.
29. *Говорков В.А.* Электрические и магнитные поля. —М.: Энергия, 1968. —488 с.
30. *Голд Л., Синха Н.* Реологическое поведение льда при малых деформациях// Физика и механика льда. —М.: Мир, 1983. —С. 116—126.
31. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Механика разрушения ледяного покрова. —М.: ИПМ АН СССР. 1982. —72 с.
32. ГОСТ 8.326-78. Метрологическое обеспечение разработки, изготовления и эксплуатации нестандартизованных средств измерений. —М.: Изд-во стандартов, 1983. —14 с.
33. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения. —М.: Изд-во стандартов, 1984. —53 с.
34. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. —М.: Изд-во стандартов, 1985. —38 с.
35. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. М.: Изд-во стандартов, 1979. —10 с.
36. ГОСТ 8.401-80. Классы точности средств измерений. Общие требования. —М.: Изд-во стандартов, 1984. —12 с.
37. *Григорьев Н.О., Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А.* Электромагнитное излучение при динамических процессах во льду//Проблемы наук о Земле. —Тбилиси: Изд-во АН ГрССР, 1978. —С.137.
38. *Гудкович З.М., Романов М.А.* Об основных закономерностях дрейфа льдов в центральном полярном бассейне//Мат. конф. "Взаимодействие атмосферы и гидросферы в северной части Атлантического океана". —Вып. 3—4. —Л.: Гидрометеиздат, 1987. —С. 75—78.

39. Гудкович З.М., Сытинский А.П. Некоторые результаты наблюдений над приливными явлениями в Арктическом бассейне при помощи наклономеров//Изв. АН СССР. Океанология. —1965. —Т.5, вып. 5. —С. 75—85.
40. Дерюгин К.К., Степанюк И.А. Морская гидрометрия. —Л.: Гидрометеиздат, 1974. —392 с.
41. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. —Л.: Гидрометеиздат, 1975. —С.205—232.
42. Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д. Кратковременная ползучесть льда. —Новосибирск: Наука, 1982. —121 с.
43. Иванов К.Е., Кобеко П.П., Шульман А.Р. Деформация ледяного покрова при движении грузов//Журнал техн. физики. —1946. —Т. XVI, вып. 3. —С. 75—85.
44. Касахара К. Механика землетрясений. —М.: Мир, 1985. —264 с.
45. Качурин Л.Г., Колев С., Псаломщиков В.Ф. Импульсное радиоизлучение, возникающее при кристаллизации воды и некоторых диэлектриков//Докл. АН СССР. —1982. —Т. 267, № 2. —С.347—350.
46. Качурин Л.Г., Григоров Н.О., Псаломщиков В.Ф. и др. Электромагнитное излучение снега и льда при динамических процессах//Доклады АН СССР. —1979. —Т. 248, № 3. —С.583—585.
47. Качурин Л.Г., Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А. Нетепловое радиоизлучение интенсивно деформирующихся ледяных покровов естественных водоемов//Исследования Земли из космоса. —1984, № 3. —С. 60—64.
48. Качурин Л.Г., Андросенко В.Я., Степанюк И.А., Псаломщиков В.Ф. Дистанционное зондирование напряженно-деформированного состояния ледяных покровов акваторий//Вопросы проектирования судов, плавающих во льдах. Межвузовский сб. научн. трудов. —Горький: Изд-во ГПИ, 1988. —С. 92—97.
49. Качурин Л.Г., Григоров Н.О., Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А. Электромагнитное излучение льда//Физическая активация водных систем и биологических объектов. —Л.: Изд. Агрофизического ин-та, 1979. —С. 23—28.
50. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Т. 2. —М.: Мир, 1984. —822 с.
51. Коростелев В.Г. Экспериментальное определение групповых скоростей изгибных волн методом узкополосной фильтрации//Тр. ААНИИ. —1984. —Т.386. —С. 129—131.
52. Купецкий В.Н. Макроособенности напряженного состояния ледяного покрова//Тр. ААНИИ. —1974. —Т. 316. —С. 18—24.
53. Легеньков А.П. Подвижки и приливные деформации дрейфующего льда. —Л.: Гидрометеиздат, 1988. —104 с.
54. Лоцилов В.С., Воеводин В.А., Борисов Р.А. Применение самолетной радиолокационной станции бокового обзора для исследований морских льдов//Исследование и освоение Мирового океана. —Вып. 72. —Л.: Изд. ЛПИ, 1980. —С.40—50.
55. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. —М.: Энергия, 1978. —248 с.
56. Миллер К. Применение механики разрушения к ледовым проблемам//Физика и механика льда. —М.: Мир, 1983. —С. 215—232.
57. Никитин В.А., Колесов С.А. Механические напряжения и линейные нагрузки при сжатии льдов//Тр. ААНИИ. —1995. —Т.435. —С.81—88.
58. Патент № 2038277, RU. МКИ В 65 G 67/60. Временный причал для проведения погрузочно-разгрузочных работ в условиях Арктики и замерзающих морей/Ю.М.Бацких, И.А.Степанюк. —№ 5026416/11. —Заявл. 09.07.91. —Опубл. 27.06.95. —Бюл. № 18.
59. Патент № 2065371, RU. МКИ В 63 В 35/08. Способ движения ледокола через ледяной покров/Ю.М.Бацких, И.А.Степанюк, А.Л.Чупыра. —№ 5015590/11. —Заявл. 09.07.91. —Опубл. 20.08.96. —Бюл. № 23.

60. Паундер З. Физика льда. —М.: Мир, 1967. —189 с.
61. Перельман М.Е., Хатиаишвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков//Докл. АН СССР. —1981. —Т. 256, № 4. —С. 824—826.
62. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. —Л.: Морской транспорт, 1968. —343 с.
63. Проворкин А.В., Ципин В.В. Ледовая информация, получаемая с метеорологических ИСЗ//Гр. ААНИИ. —1988. —Т. 401. —С. 141—148.
64. Псаломщиков В.Ф., Степанюк И.А. Электромагнитные поля снегопадов и метелей//Мат.-лы 3-го Всесоюз. симпоз. по атмосферному электричеству. —Тарту, 1986. —С. 115—116.
65. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. —М.: Наука, 1979. —744 с.
66. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. —М.: Наука, 1974. —211 с.
67. Сгибов А.П., Трухачев Б.С., Носовский А.В. Температурная компенсация ухода нуля мостового тензопреобразователя//Приборы и системы управления. —1975. —№ 11. —С. 24—26.
68. Скоков Р.М. Исследование горизонтальных подвижек устойчивого припая//Гр. ААНИИ. —1981. —Т.376. —С.134—140.
69. Смирнов В.И. Ледовые плавания и их научно-оперативное обслуживание за рубежом. —Л.: Гидрометеоздат, 1970. —223 с.
70. Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах. —СПб: Гидрометеоздат, 1996. —162 с.
71. Смирнов В.Н. Некоторые вопросы натурного исследования деформаций и напряжений в ледяном покрове//Гр. ААНИИ. —1975. —Т.331. —С. 133—140.
72. Смирнов В.Н. Определение упругих характеристик ледяного покрова с помощью динамических и статических методов//Гр. ААНИИ. —1971. —Т.300. —С. 56—60.
73. Смирнов В.Н., Линьков Е.М. Методика наблюдений за колебаниями ледяного покрова с помощью наклономеров//Гр. ААНИИ. —1971. —Т. 300. —С.213—219.
74. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И. Приборы для изучения деформаций и напряжений в ледяных полях//Гр. ААНИИ. —1983. —Т. 379. —С.92—96.
75. Смирнов В.Н., Шушлебин А.И. Результаты наблюдений за естественными деформациями ледяных полей//Изв. АН СССР. Физика Земли. —1988. —№ 12. —С. 75—78.
76. Смирнов В.Н., Шейкин И.Б., Шушлебин А.И. Сжатия льдов и локальные деформации ледяного поля в Северном Ледовитом океане//Гр. межд. конф. РОАС-95. —1995. —Т.IV. —С. 52—57.
77. Степанюк И.А. Измерения естественного электромагнитного излучения, возбуждаемого при сжатиях в морском ледяном покрове//Мат.-лы 2-й всесоюзной конференции по механике и физике льда. —М.: ИПМ АН СССР, 1983. —С. 70—71.
78. Степанюк И.А. Метод аэрокартирования аномалий электропроводности морской воды//Методы океанологических исследований. Вып. 59. —Л.: Изд. ЛГМИ, 1976. —С. 46—51.
79. Степанюк И.А. Океанологические измерительные преобразователи. —Л.: Гидрометеоздат, 1986. —272 с.
80. Степанюк И.А., Бацких Ю.М. Возможность использования электромагнитных полей для целей дистанционной индикации зон деформаций припайного льда// Природа и хозяйство Севера. —1982. —Вып. 10. —С. 47—50.
81. Степанюк И.А., Михневски Н.Д. Электрокинетический механизм возбуждения электромагнитного поля при деформации льда//Хидрология и метеорология, 1984. —Т. 35, № 6. —С. 3—8.

82. *Сытинский А.Д., Трипольников В.П.* Некоторые результаты исследований естественных колебаний ледяных полей Центральной Арктики//Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. —1964. —№ 4. —С.210—212.
83. *Трохан А.М., Лапшин А.И., Гудзенко О.И.* Криолюминисценция жидкостей// Докл. АН СССР. —1983. —Т.271, № 1. —С.83—86.
84. *Трухачев Б.С., Удалов Н.П.* Полупроводниковые тензопреобразователи. —М.: Энергия, 1968. —78 с.
85. Ультразвук/Под ред. И.П.Голямина. —М.: Советская энциклопедия, 1979. —400 с.
86. Ферриты и магнитодиэлектрики/Под ред. Н.Д.Горбунова и Г.А.Матвеева. —М.: Советское радио, 1968. —176 с.
87. Физика и механика льда/Под ред. П.Трюде. —М.: Мир. —1983. —256 с.
88. *Фомин В.А., Родионов В.Н.* О диссипации механической энергии во льду//Докл. АН СССР. —1985. —Т.285, № 6. —С.1362—1364.
89. *Хейсин Д.Е.* Динамика ледяного покрова. —Л.: Гидрометеоздат, 1967. —215 с.
90. *Хиблер У.Д., Уикс У.Ф. и др.* Измерение среднемасштабной деформации морских льдов в море Бофорта (Айджекс-1971)//Проблемы Арктики и Антарктики. —1974. —Вып. 43—44. —С. 119—138.
91. *Шушлебин А.И.* Длительное деформирование ледяного поля в районе дрейфующей станции “Северный полюс-24”//Тр. ААНИИ. —1984. —Т. 386. —С.72—75.
92. *Coon M.D., Lau P.A., Bailey S.H., Taylor B.J.* Observations of ice stress in the Eastern Arctic. POAC 89, The 10th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions//Proceedings, Lulea, Sweden. —1989. —Vol. 1. —P. 44—53.
93. *Croasdale K.R., Comfort G., Frederking R. et al.* A pilot experiment to measure arctic pack ice driving forces//Proc. of the 9th Int. Conf. POAC. —1987. —Vol.2. —P. 629—642.
94. *Frederking R.* An introduction to the measurement and interpretation of dynamic ice loads on complaint structures//IAHR Special Report 89-5, Working on ice force. —1989. —P. 167—187.
95. *Garsey F.D., Zwally H.J.* Remote sensing as a research tool//Geophys. Sea Ice: Proc. NATO Adv. study inst. Air-sea Ice Interact., Acquafredda di Maratca, Sept.28-Oct.10, 1981. —New York—London, 1986. —P. 1021—1098.
96. *Heering P.* Acoustic measurement and applications of kinetic impacts on ice//Progr. underwater Acoust: Proc. 12 th Int. Congr. Acoust. Assoc. Symp. Underwater Acoust., Halifax, July 16-18, 1986. —New York—London, 1987. —P. 611—617.
97. *Lau P.A., Knoke G.S.* Arctic ice measurement//Proc. of OCEAN'91, October. —P. 22—27.
98. *Lizuka K., Freundorfer A. et al.* Measurement of saline ice thickness using a step frequency radar//Gold Red Sci and Technol. —1988, Vol.15, № 1. —P. 23—32.
99. *Mason B.I.* Ice crystals of spiral form grown from the vapour//Phil. Mag., 1952. —Vol.43. —P. 911—913.
100. *Metge M., Strilchuck A., Trofimenkoff P.* On recording stresses in ice//IAHR Third Internat. Ice Sypos. Proc. —P. 459—468.
101. *Miheno H. et all.* Rev. Radio Res. Lab. —1987, —Vol. 33. —№ 169. —P.275—283.
102. *Moore S. C., Wadhams P.* Recent developments in strainmeter design//Workshop on sea ice field measurements, St. John's, Newfoundland, February 29—May 1, 1980—1981. —P. 42—47.
103. *Nelson R.* Internal stress measurements in ice sheets using imbedded load cells// Proc. of POAC. University of Alaska. —Fairbanks, 1975. —P. 21—25.
104. *Onstott Robert G.* Theoretical and experimental study of the radar backscatter of Arctic sea ice//ICAPSS'87: int Geosci. and Remote sens. Sump., Ann. Arbor, Mich. —1987. —Vol.2. —P. 1127—1129.

105. *Pikington R.R., Metge M., Stranberg A.G.* A new sensor for measuring ice forces on structures//Laboratory tests and field experience. POAC 1983. —Helsinki, 1983. —P. 70—75.
106. *Rauste Yrjo.* Use of radar (SLAR) in mapping of sea ice//Meri. —1987. —№ 15. —P. 77—98.
107. *Rossmann F.* Polar Kristallform und Electriche Erregung des Eises//Experimentia. —1950. —№ 6. —S. 182—184.
108. *Sackinger W.M., Nelson R.D.* Experimental measurements of sea ice failure stresses near grounded structure. —Contract, Alaska, 1978. —90 p.
109. *Tabata T.* Deformation and movement of drift ice//Inter-Nord. —1975. —№ 12. —P. 335—347.
110. *Templeton J.S.* Measurements of sea ice pressures//Proc. Offshore Mechanics and Arctic Eng. Conf. —1979. —Vol.1. —P. 73—87.
111. *Vallaake N.C., Holladay J.Scott.* Airborne electromagnetic sounding of sea ice thickness and subice bathymetry//Gold Red Sci and Technol. —1987. —Vol.14. № 3. —P. 289—311.
112. *Vesecky I.F., Samadani R. et al.* Observation of sea-ise dynamics using synthetic aperture radar images: automated analysis//IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. —1988. —Vol. 26, № 1. —P. 38—48.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основные характеристики динамики ледяного покрова	6
1.1. Деформационные процессы в морских льдах	6
1.1.1. Механика деформируемого льда	6
1.1.2. Механика разрушения льда и излучение упругих волн	11
1.2. Сжатия в ледяном покрове моря и их влияние на эффективность арктических морских технологий	14
1.2.1. Сжатия в дрейфующих льдах	14
1.2.2. Сжатия в припайных льдах	20
1.3. Подвижки морских льдов	23
1.3.1. Подвижки в дрейфующих льдах	23
1.3.2. Подвижки припайного льда	26
Глава 2. Дистанционные методы измерений характеристик ледовых сжатий	27
2.1. Определение сжатий по характерным признакам состояния ледяного покрова	27
2.2. Методы дистанционной регистрации сжатий путем использования эффекта собственного электромагнитного излучения деформирующегося льда	30
2.2.1. Физические основы возбуждения собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) при деформационных процессах в ледяном покрове	30
2.2.2. Принципы картирования распределения механических напряжений (сжатий) с авиасредств ледовой разведки	47
2.2.3. Измерительные средства, применяемые при регистрации собственного ЭМИ деформирующихся льдов	51
2.2.4. Регистрация сжатий с авиасредств в дрейфующих льдах и в районе кромки припая	53
2.2.5. Регистрация характеристик сжатий в припайных льдах	56
2.2.6. Методы выявления и картирования магистральных трещин в сжатых припайных льдах	60
Глава 3. Контактные методы измерений характеристик деформационных процессов в морском льду	70
3.1. Прямые контактные методы	70
3.1.1. Принципы измерений	70
3.1.2. Чувствительные элементы, применяемые при измерениях	75
3.2. Измерительные преобразователи деформаций и перемещений для измерений во льдах	79
3.2.1. Резистивные преобразователи	79
3.2.2. Индуктивные преобразователи	96
3.2.3. Резонансные преобразователи	104
3.2.3. Объемные тензопреобразователи	114

Глава 4. Методы измерений подвижек морских льдов	116
4.1. Контактные методы измерений подвижек припайного льда	116
4.2. Определение подвижек дрейфующих льдов	122
Список литературы	128

СТЕПАНЮК Иван Антонович
СМИРНОВ Виктор Николаевич

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК
ДИНАМИКИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Редактор Ю.В.Виноградова
Оригинал-макет и обложка А.А.Меркулов

ЛР № 020228 от 10.11.96

Подписано в печать 10.02.2001.
Печать офсетная. Печ. л. 8,5.

Формат 60 × 90 1/16
Тираж 1000 экз.

Гидрометеоиздат, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38