

На правах рукописи
УДК 551.46+551.326.7

Харитонов Виктор Витальевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ТОРОСОВ И СТАМУХ С
ПОМОЩЬЮ ТЕРМОБУРЕНИЯ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург 2005

Работа выполнена в государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Смирнов Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-
математических наук, профессор
Шхинек Карл Натанович;

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Лебедев Герман Андреевич

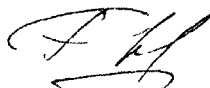
Ведущая организация: Российский государственный
гидрометеорологический
университет,
С.-Петербург

Защита состоится 20 октября 2005 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 327.002.01 при государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» по адресу: 199397, С.-Петербург, ул. Беринга, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Автореферат разослан « 19 » сентября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Радионов В.Ф.

2016-4
12563

2170913

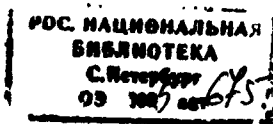
ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одной из главных задач ледотехники по обеспечению эффективности проведения транспортных операций во льдах и безопасной эксплуатации ледостойких сооружений является изучение ледяного покрова на шельфе замерзающих морей (ровный лед, торосы, стамухи). Расчет возможных ледовых нагрузок на сооружения, проектирование трубопроводов по морскому дну и т. д. требуют знания строения и свойств этих ледяных образований. От изученности ледовых условий шельфа зависят технико-экономические показатели разработки месторождений нефти и газа в этих районах России.

Торосы и стамухи, представляющие собой природные образования из соленого и пресноводного льда с беспорядочной структурой, являются объектами натурных исследований. Однако большие размеры и сложное внутреннее строение этих образований существенно сужают диапазон применяемых для их исследования средств. Механическое бурение, обычно используемое для изучения ледников, в данном случае ограничивается либо небольшой глубиной скважин, либо громоздкостью и весом оборудования. Известные дистанционные методы исследования льда, такие как радиолокация и гидролокация, в настоящее время с трудом могут обеспечить получение достоверных данных о внутреннем строении торосов и стамух из-за сильного рассеяния волн во время зондирования неоднородного льда.

При исследовании торосов и стамух доставка людей и оборудования к месту работы производится судном или вертолетом. Работа ведется в условиях ограниченного времени пребывания на льду. В этом случае может быть успешно использовано тепловое бурение, которое широко применяется в ледовых исследованиях. Высокая производительность, небольшие габариты и вес установок, запись на компьютер параметров бурения – вот основные преимущества теплового бурения перед другими способами исследования льда.

Учитывая повышенный интерес нефтяных и газодобывающих компаний к районам добычи углеводородов на шельфах замерзающих морей, настоящая работа является актуальной.



Цель и задачи исследования. Цель работы заключалась в определении внутреннего строения торосов и стамух по записи параметров их теплового бурения, а также в создании и внедрении методики обработки данных термобурения этих ледяных образований. В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать влияние физических характеристик льда и веса бура на скорость теплового бурения.

2. Развить существующую математическую модель контактного плавления применительно к соленому льду.

3. Разработать методику обработки данных термобурения торосов и стамух.

4. Разработать методику определения границ консолидированного слоя торосов и стамух.

5. Разработать методические основы определения обобщенных характеристик внутреннего строения торосов и стамух с помощью усреднения данных теплового бурения.

6. Исследовать внутреннее строение торосов и стамух в различных регионах.

Под обобщенными характеристиками понимаются распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине, средняя толщина консолидированного слоя, коэффициент заполнения, вероятность нахождения льда на заданной глубине, объемное содержание воздуха.

Основные защищаемые положения.

1. Методика определения границ пустот, участков плотного и рыхлого льда.

2. Методика определения границ консолидированного слоя торосов и стамух.

3. Методические основы определения обобщенных характеристик внутреннего строения торосов и стамух с помощью усреднения данных теплового бурения.

4. Усовершенствованная математическая модель контактного бурения плавлением нагревательной коронкой электротермобура

Под пустотами понимаются промежутки между блоками льда, заполненные воздухом, снегом или водой. Под рыхлым льдом понимается лед пористостью более 20 % или прочностью при сжатии менее 0,05 МПа, а также область, заполненная мелкими кусками льда

Научная новизна работы заключается в следующем: а) впервые предложен способ определения внутреннего строения торосов и стамух, пористости слагающего их льда и границы льда и грунта с помощью записи параметров термобурения; б) предложена физически обоснованная методика определения по записи параметров бурения расположения и размеров пустот, границ плотного и рыхлого льда, границ консолидированного льда, глубины расположения границы льда и грунта, наличия загрязнения льда; в) предложен способ оценки распределения пористости льда, слагающего торос или стамуху, коэффициента заполнения тороса или стамухи, вероятности нахождения льда на заданной глубине; г) выявлены особенности внутреннего строения торосов в различных регионах; д) показан источник методической ошибки при определении толщины консолидированного слоя по скорости термобурения по субъективным ощущениям оператора, в результате чего ее величина часто оказывается завышенной.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации апробировались при обработке материалов восьми экспедиций, проводимых Арктическим и Антарктическим НИИ в 1997-2005 годах на шельфах Печорского, Охотского, Каспийского и Азовского морей, в Обской губе, и вошли в соответствующие технические отчеты. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 8-и печатных работах. Основные положения диссертации были напечатаны в трудах 6-й Международной конференции по судам и морским конструкциям в холодных регионах (С.-Петербург, Россия, 2000 г.), 16-й, 17-й и 18-й Международных Конференциях РОАС (Оттава, Канада, 2001 г., Финляндия, 2003 г., Потсдам, США, 2005 г.), RAO'03 (С.-Петербург, Россия, 2003 г.). Кроме этого по результатам исследований получен Патент (в соавторстве) на изобретение № 2153070 от 20.07.2000 (Бюллетень № 20).

Практическая ценность и внедрение результатов исследования. Предлагаемый способ исследования торосов и стамух обеспечивает получение объективной информации о внутреннем строении этих ледяных образований, поскольку скорость погружения термобура при тепловом бурении торосов и стамух фиксируется компьютером независимо от субъективных ощущений оператора. В рамках этого способа разработаны методика определения границ пустот, участков плотного и рыхлого льда, а

также методика непосредственного определения границ консолидированного слоя. Запись параметров бурения на компьютер позволяет в короткие сроки проводить обработку собранного материала. Использование водяного бурения позволяет сделать большое количество скважин в течение рабочего дня, и, следовательно, обследовать большую площадь тороса/стамухи или обследовать ограниченную площадь более детально. Разработанные методические основы определения обобщенных характеристик внутреннего строения тороса позволяют получить представление о распределении пористости льда по глубине. Данные о морфологических характеристиках торосов и стамух, полученные в результате применения предлагаемых в диссертации методик, используются фирмами ЕХХОН, АО «Севморнефтегаз», ЗАО «Варандейнефтегаз», ООО «Газфлот», ОАО НК «Лукойл», Norsk Hydro ASA, Statoil при проектировании нефтяных и газодобывающих платформ.

Фактический материал. В основу диссертации положены данные, собранные автором в 12 морских экспедициях в Печорское, Охотское, Каспийское, Азовское моря, в Обскую губу и в Арктический бассейн, в течение 3 полевых сезонов на Ладожском озере, 1 полевого сезона на Финском заливе, 3 комплексных работ в ледовом бассейне ААНИИ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц, включая 46 рисунков и 9 таблиц. Список использованной литературы включает 77 наименований.

* * *

Автор искренне благодарен Е.У. Миронову, В.А. Никитину, А.И. Шушлебину, С.М. Ковалеву, Б.П. Егорову, К.П. Тышко, В.В. Панову и В.А. Воеводину за доброжелательное отношение и ценные критические замечания. Особую признательность автор выражает В.А. Мореву – за помощь и содействие в работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность предлагаемой работы, формулируются ее цель, задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность.

Первая глава содержит аналитический обзор литературы по теме исследования.

Внутреннее строение торосов и стамух определяется случайным образом ориентированными обломками льда, в результате смерзания которых между собой образуется ледяной костяк торосистого образования со сложной пространственной структурой. Для исследования торосов и стамух широко применяются различные способы бурения - бурение мотобуром, электромеханическое бурение, электротермобурение и водяное термобурение. В частности, рассмотрены результаты полевых измерений морфометрии торосов с помощью мотобура Ковакса, шнеково-термический метод бурения, водяное тепловое бурение. С помощью бурения можно получать информацию и о плотности льда. Изложен способ измерения плотности льда на горных ледниках. Суть его заключалась в погружении в снежно-ледяной покров термобура, на нагреватель которого подавалась тепловая энергия постоянной мощности, измерялось время погружения термобура, и определялась плотность льда по градуировочной кривой.

Подробно рассмотрена методика исследования морфометрических параметров торосов и стамух с помощью термобурения, разработанная в СахалинНИПИморнефть. По степени возрастания скорости проходки скважин его сотрудниками были выделены: плотный лед, рыхлый лед, шуга, пустоты. Отмечены методические проблемы определения таких характеристик льда как температура, прочность при сжатии и изгибе с помощью образцов из керна, полученного в результате теплового бурения, регистрации скорости проходки по субъективным ощущениям оператора бурения и соответствия ее пористости льда.

Рассмотрен опыт применения компьютерной записи параметров бурения для изучения внутреннего строения ледяных образований и для контроля процесса бурения.

Важной характеристикой внутреннего строения торосов и стамух является толщина консолидированного слоя (КС). Наиболее точно толщина КС определяется по взятым кернам или по температурным измерениям. Некоторые авторы определяют КС с помощью бурения как первый сплошной блок льда ниже уровня воды без больших пустот. В ряде работ нижняя граница КС определялась как глубина ниже уровня моря, на которой в скважине тороса

появлялась морская вода. Рассмотрен косвенный метод оценки толщины КС. Изложены некоторые принципы определения границ КС путем экспертной оценки.

В заключение обзора приведены остающиеся нерешенными следующие проблемы: реальная конфигурация пустот в теле тороса или стамухи; визуальное, субъективное определение характеристик льда по скорости термобурения; регистрация скорости бурения и соответствие ее пористости льда; определение границ консолидированного слоя. Представленный литературный обзор позволил сформулировать изложенные выше задачи настоящего исследования и подтвердил научную значимость и современность работы.

Во второй главе исследовано влияние физических характеристик льда на скорость термобурения.

В первом разделе главы приведены схемы установок для электрического и водяного бурения льда. Бурение скважин проводится на постоянной мощности. Дано краткое описание составных частей установок, их назначение и работа. Приведены основные технические характеристики установок. Представлено краткое описание формы нагревательной коронки электротермобура. Более подробно рассмотрено определение скорости погружения термобура с помощью датчика угловых перемещений измерительного колеса, дана расчетная формула. Приведена методика определения градуировочного коэффициента, зависящего от диаметров измерительного колеса и бурового кабеля или шланга. Даны описание измерителя уровня воды, его принцип действия, методика определения с его помощью расстояния от поверхности льда (снега) до уровня воды в скважине. Приведено краткое описание каналов данных, их разрешение.

Программное обеспечение установок состоит из двух частей: микропрограмма, записанная в память микроконтроллера блока электроники, и программа для связи микроконтроллера с компьютером. Инструкция по управлению программой выдается при ее запуске на экран компьютера.

Эффективность установок для водяного и электротермобурения с записью его параметров на компьютер подтверждены во время полевых работ в различных регионах.

Во втором разделе главы приведены результаты экспериментальной проверки зависимости скорости термобурения от физических характеристик льда и веса термобура.

Определение внутреннего строения торосов и стамух с помощью термобурения подразумевает знание зависимостей параметров бурения от физических характеристик льда, слагающего эти ледяные образования. Для расчета этих зависимостей необходима математическая модель контактного бурения-плавления льда нагревательной коронкой электротермобура. Такая модель контактного плавления существует. Одним из условий данного теоретического расчета является постоянство теплофизических характеристик плавящегося твердого тела. Однако теплоемкость соленого льда с повышением его температуры возрастает и при температуре таяния стремится к бесконечности. Для успешного применения теоретического расчета к соленому льду данное обстоятельство учтено автором следующим образом. Количество теплоты Q_s , требуемое для плавления единицы массы соленого льда с некоторой начальной температурой t_n , определяется формулой Швердтфегера:

$$Q_s = (L - c_T t_n) \left(1 - \frac{\xi}{\alpha t_n} \right) + \frac{\xi (c_{\infty} - c_T)}{\alpha} \ln \left(\frac{\xi}{\alpha t_n} \right)$$

где L – удельная теплота плавления; c_T , c_{∞} – удельные теплоемкости льда и расплава; s – солёность льда в относительных единицах, $\pm = -1,8 \pm 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Величина $(L - c_T t_n)$ – это количество теплоты, требуемое для плавления единицы массы пресного льда с некоторой начальной температурой t_n . Второе слагаемое в формуле не превосходит 1 % от первого в диапазоне солёностей и температур исследуемого льда.

Таким образом, солёность льда с небольшой погрешностью отражается на поступающем в лед тепловом потоке наличием

множителя, $\left(1 - \frac{\xi}{\alpha t_s} \right)$ использование которого будет правомерно в

данном расчете. Поэтому, чтобы учесть солёность льда, достаточно в ту часть расчета, где определяется количество теплоты, поступающее к поверхности плавления, к соответствующему выражению добавить множитель $\left(1 - \frac{\xi}{\alpha t_s} \right)$

Приведено описание экспериментов по исследованию зависимости скорости бурения от физических характеристик льда и веса электротермобура. Дано определение к.п.д. нагревательной коронки. Описан численный эксперимент, в результате которого был получен массив значений к.п.д. выбранной коронки в зависимости от температуры, солёности, плотности льда, удельного содержания воздуха и от реально прилагаемой электрической мощности. Проанализирована зависимость к.п.д. от мощности, подаваемой на термобур, дана аппроксимация этой зависимости. Приведены сопоставление расчетной зависимости скорости бурения от подаваемой мощности с экспериментальными данными и калориметрическая формула, связывающая скорость бурения с подаваемой мощностью. Отмечено, что вес бура не оказывает заметного влияния на скорость бурения. Эксперименты показали, что влияние температуры льда на скорость бурения невелико, поскольку основное количество тепла идет на плавление, и только небольшая часть идет на прогрев льда от исходной температуры до температуры плавления. Скорость бурения солёного льда выше скорости бурения пресноводного пропорционально объёмному содержанию рассола. Дана зависимость приведенной скорости бурения (скорости на единицу подаваемой мощности) от плотности льда. Эта зависимость является степенной функцией. Модификации формы рабочей поверхности коронок термобура ААНИИ не дают сколько-нибудь заметного отличия по скорости бурения.

Приведено описание экспериментов по исследованию зависимости скорости водяного бурения от физических характеристик льда и веса термобура. Отмечены особенности характера погружения водяного термобура при бурении различных образцов льда. Высказано предположение о влиянии силы инерции термобура. Проиллюстрировано влияние солёности и плотности льда на скорость водяного бурения. Несмотря на большой разброс экспериментальных значений, заметно отличие скорости бурения солёного льда от скорости бурения пресного, особенно при низких плотностях льда. Температура льда не оказывает существенного влияния на скорость водяного бурения. К сожалению, выигрыш в скорости водяного бурения по сравнению с электротепловым влечет за собой проигрыш в мобильности установки для водяного бурения.

В третьем разделе главы приведено описание экспериментов по исследованию влияния на скорость термобурения наличия во

льду минеральных и органических включений. При достижении электротермобуром грязевой прослойки его скорость резко уменьшалась вплоть до остановки. Происходило вскипание талой воды под коронкой, что было заметно по характерному шуму и вертикальной вибрации термобура. Самоочистка забоя при прохождении термобуром грязевых прослоек определяется возможностью удаления грязевых частиц из зоны забоя. Вскипающая под носком коронки талая вода достаточно легко уносит частицы мелкого песка и глины, которые в дальнейшем остаются в талой воде скважины в виде взвеси. Крупные частицы, в частности гравий, прогреваясь нагревательной коронкой, вплавлялись в лед и продолжали двигаться впереди коронки, резко уменьшая теплоотвод с ее поверхности. Грязевая взвесь уходит в стороны, если прослойка находится не внутри льда, а на дне полости. Для преодоления грязевых прослоек наилучшей будет коническая форма нагревательной коронки.

На скорость водяного бурения наличие минеральных и органических включений не оказывает заметного влияния.

В четвертом разделе главы приведено описание экспериментов по исследованию связи прочности льда с его текстурными особенностями и скоростью термобурения. Отражен качественный характер зависимостей скорости бурения от текстурных характеристик. Имеется небольшая положительная корреляция скорости бурения и размеров сферических включений. При высоких скоростях бурения можно делать вывод, что прочность проходимого термобуром льда невысока. Для качественной оценки изменчивости прочности льда и определения текстуры льда с помощью термобурения предпочтительным является водяное бурение. Относительные изменения скорости на участке скважины, где воздушные включения носят замкнутый характер, примерно одинаковы для обоих видов бурения. На участке рыхлого и разрушающегося льда, где поры сообщаются друг с другом и с окружающей средой, относительные изменения скорости водяного бурения значительнее, чем при электротермобурении.

В заключительном разделе главы приведено краткое описание технологии бурения с записью параметров на компьютер. Весь процесс бурения можно условно разделить на три этапа: подготовка, бурение, завершающие операции. Изложен перечень операций,

необходимых для приведения оборудования в состояние, необходимое для осуществления бурения и записи параметров бурения на компьютер. Далее перечислены действия оператора по проведению бурения скважины и контролю записи параметров бурения. Кратко описана работа программы связи блока электроники с компьютером. По окончании бурения измеряется уровень воды в скважине.

Третья глава посвящена разработанной методике исследования внутреннего строения торосов и стамух с помощью термобурения.

В первом разделе главы рассмотрена методика определения по скорости погружения термобура границ пустот, участков плотного и рыхлого льда. Необходимым условием валидности этого определения является бурение скважин при постоянной тепловой мощности или учет изменения мощности во время бурения.

Определение пустот

Двумодальность распределения скоростей электротермобура говорит о том, что оно отражает два различных процесса: движение бура во льду и падение бура в пустоте. Для определения граничной скорости перехода бура изо льда в пустоту следует взять скорость, соответствующую минимуму гистограммы в промежутке между модами, и исключить из рассмотрения все скорости больше выбранной. В приведенном примере 99 % значений оставшихся скоростей имеют верхний предел 2,5 см/с. Это значение скорости принимается в качестве граничного, и участки на записи со скоростью выше 2,5 см/с идентифицируются как пустоты. При водяном бурении более эффективен следующий подход. Скорость бура в пустоте начинает равномерно нарастать, но из-за наличия бурового шланга и сопротивления среды ускорение бура меньше ускорения свободного падения. Выделив на графике скорости участки, где ускорение бура положительно и имеет величину больше некоторой заданной величины на участке, длина которого определяется разрешающей способностью буровой коронки, можно считать их участками разгона бура, т.е. провалом в пустоту. Нижняя граница пустоты определяется по резкому замедлению бура.

Определение участков плотного и рыхлого льда

Рассмотрен критерий выделения на записях слоев плотного и рыхлого льда, разработанный по результатам тестового бурения

нескольких скважин на ровном льду путем подбора различных комбинаций статистических характеристик скорости бурения.

Отмечено, что в настоящее время подход к определению участков плотного и рыхлого льда по записям электрического и водяного бурения одинаков. На большинстве записей скорости бурения методом экспертных оценок, основанных на результатах тестового бурения образцов льда, выделяются участки плотного и рыхлого льда. Объединив значения скоростей бура на участках плотного льда и на участках рыхлого льда в два массива, можно построить распределения скоростей бурения плотного и рыхлого льда (рисунок 1(а, б)). Эти распределения близки к нормальному. Критерий определения участков плотного и рыхлого льда следующий. Скорость погружения термобура меньше некоторой граничной скорости соответствует плотному льду. Промежуточные участки, идентифицированные ранее как лед, на которых скорость бура выше граничной скорости, идентифицируются как рыхлый лед или участок перехода бура из плотного льда в пустоту. Граничной скоростью будет такая скорость, принадлежность которой к массиву скоростей бурения плотного льда и к массиву скоростей бурения рыхлого льда равновероятна. Графически это означает, что площадь под кривой плотности распределения скоростей бурения плотного льда в диапазоне скоростей ниже граничной будет равна площади под кривой плотности распределения скоростей бурения рыхлого льда в диапазоне скоростей выше граничной скорости (рисунок 1(в)). Строятся зависимости: «порядок процентиля – процентиль» для распределения скоростей бурения плотного льда и «1 минус порядок процентиля – процентиль» для распределения скоростей бурения рыхлого льда. Пересечение этих двух кривых дает граничную скорость перехода из плотного льда в рыхлый лед с соответствующим уровнем значимости. Выбранное в качестве критерия плотного льда значение относится непосредственно к полученным данным, и будет отличаться, если бурение проводилось в других условиях, например, в более холодное время года, в другом регионе, или при более низкой/высокой температуре рабочей воды.

Во втором разделе главы рассмотрена методика определения границ консолидированного слоя. Консолидированная часть льда водонепроницаема, поэтому при тепловом бурении-плавлении в скважине находится талая вода. Эта вода вытекает из скважины и

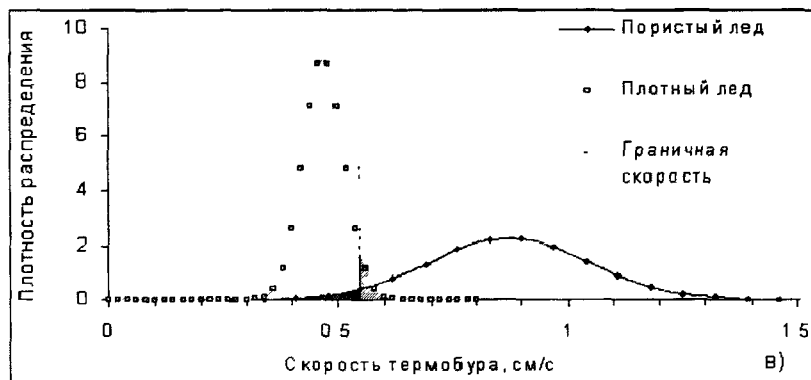
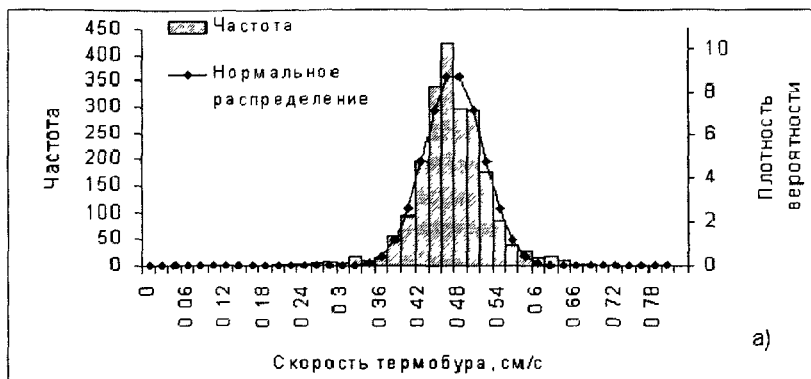


Рис. 1— Гистограммы скоростей бурения плотного (а) и рыхлого (б) льда торосов Печорского моря (1999 год), аппроксимированные нормальным законом распределения (в).

растекается по верхней поверхности консолидированного льда. При выходе бура в пористый несмороженный лед уровень воды в скважине установится на уровне моря. Определение границ консолидированного льда производится по записи скорости бурения и измерения уровня воды в скважине. По изменению уровня воды выделяются границы консолидированного водонепроницаемого льда, которые уточняются по расположению участков рыхлого льда и пустот во льду, определяемому по скорости бурения. Если верхняя граница КС располагается выше уровня моря, в момент выхода бура в пористый лед уровень и давление воды в скважине уменьшаются. На рис. 2 приведен пример определения границ КС. Определение уровня воды в скважине производится с помощью датчика давления, установленного на термобуре на расстоянии 16,7 см от торца буровой коронки. Ход изменения давления воды в скважине показан на рисунке линией, где точками отмечено измеренное давление в условных единицах. При заглублении термобура в консолидированный слой на высоту расположения датчика давления, последний начинает показывать нарастание давления воды (первая пунктирная линия). Как только термобур проходит КС, и вода из скважины просачивается в полость, сообщающуюся с морем, уровень воды в скважине сравнивается с уровнем моря. Горизонт отклонения графика давления воды от первой пунктирной линии дает положение нижней границы КС. После этого по мере движения бура давление воды опять начнет повышаться соответственно глубине погружения бура (вторая пунктирная линия). Соотнеся характер изменения давления воды в скважине с соответствующей скоростью погружения бура, можно сделать заключение, что в данном случае верхняя граница КС расположена на горизонте 22 см. Нижняя граница располагается на горизонте -22 см, где повышение скорости бурения показывает наличие рыхлого льда.

Предлагаемая методика определения границ КС ограничена случаями расположения верхней его границы выше уровня моря. В остальных случаях нижняя граница КС определяется только по записи скорости погружения бура в соответствии с выбранным критерием выделения плотного и рыхлого льда.

Применение термобурения позволяет определить глубину внедрения стамухи в грунт непосредственно в период ее существования. Под глубиной

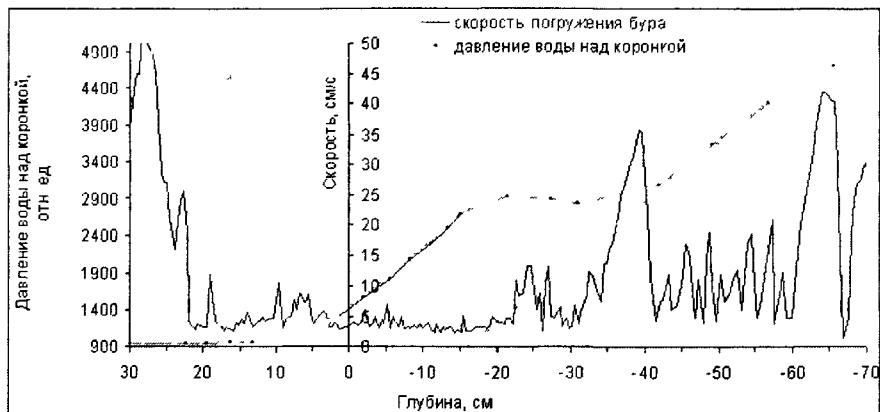


Рис. 2 – Пример определения границ консолидированного слоя по записи скорости бурения и давления воды над коронкой (фрагмент записи). Пунктирными линиями обозначен ход нарастания давления воды над коронкой.

внедрения подразумевается разность между глубиной кия стамухи и глубиной моря в данном месте. Глубина кия стамухи определяется по данным термобурения как расстояние от уровня воды в скважине до грунта. Глубина моря определяется как мода распределения расстояний от уровня моря до дна, измеренных во всех скважинах, пробуренных в стамухе. При электротермобурении расположение дна четко определяется по моменту касания нагревательной коронкой грунта и остановки бурения. При водяном бурении струи воды размывают ил и грунт, и термобур продолжает погружаться. Его скорость приобретает скачкообразный характер с периодическими остановками. Для определения границы льда и грунта необходимо провести с записанными значениями скорости бурения следующую операцию. Вычисляется минимум скорости бурения на скользящем участке глубин, длина которого эмпирически подобрана. Резкое уменьшение минимума скорости на некоторой глубине указывает на то, что характер движения термобура изменился. Этот момент обозначает переход термобура из кия стамухи в грунт. Вычисление среднего гармонического скорости бурения на участке также позволяет определять границу льда и грунта. Вычисление среднего квадратического отклонения скорости

бурения на участке более подходит для случая, когда термобур переходит в грунт из плотного пресноводного льда, образовавшегося на отмели.

В четвертом разделе главы приведены методические основы определения обобщенных характеристик внутреннего строения торосов и стамух с помощью усреднения данных теплового бурения. Скорость погружения бура обратно пропорциональна объемному содержанию твердой фазы льда. Зависимость обратной скорости бурения от глубины – это зависимость объемного содержания твердой фазы льда от глубины, или, другими словами, распределение объемного содержания твердой фазы вдоль скважины в относительных единицах. Для каждой скважины это распределение будет своим. Усреднив эти распределения по всем скважинам, можно получить среднестатистическое распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для района проведения исследований (рис. 3). Согласно выбранному критерию выделения пустот запись скорости бурения в каждой точке можно представить в виде ступенчатой кривой, где пустотам будет соответствовать 0, а льду – 1. Усреднив эти кривые по всем скважинам, можно получить оценку распределения вероятности нахождения льда по глубине для района проведения исследований (рис. 3(в)). Введя соответствующий нормировочный коэффициент, кривую рис. 3(б) можно трактовать как оценку распределения вероятности нахождения плотного льда по глубине. Разница вероятности нахождения льда на данной глубине и вероятности нахождения плотного льда дает вероятность нахождения рыхлого льда (рис. 4). Как видно из графика, на глубинах 3 и –50...–53 см происходит резкое возрастание вероятности нахождения рыхлого льда. Таким образом, лед на глубине от 3 до –50...–53 см можно считать консолидированным слоем и оценить его среднюю толщину. Усреднив ступенчатые кривые, где пустотам соответствует 0, а льду – 1, по тем скважинам, парус и киль которых не превышают рассматриваемый горизонт, можно получить распределение коэффициента заполнения среднестатистического тороса. Из условия гидростатического равновесия выведено соотношение между массой паруса, массой кия, массой снега на 1 м² площади среднестатистического тороса и средним объемным содержанием воздушной фазы кия.

В четвертой главе приведены некоторые результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух в различных регионах.

В первом разделе главы рассмотрены результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух около северо-восточного побережья о. Сахалин в 1998 году. В результате усреднения 84 записей скорости бурения получено распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине, по которому средняя толщина КС тороса оценена в 128 см. Отношение ее к средней толщине ледяных блоков, слагающих гряды торосов, равняется 2,5. Отношение толщины КС к средней толщине ровного льда находится в пределах 0,74...1,68, среднее 1,12. Значение среднего отношения «толщина КС / толщина тороса» равняется 0,17.

По распределению объемного содержания твердой фазы льда по глубине, построенному в результате усреднения 18 записей скорости бурения, среднюю толщину КС среднестатистической стамухи можно оценить в 174 см (по расположению участков плотного и рыхлого льда – 172 см). Отношение средней толщины КС стамух к средней толщине ровного льда равняется 1,8. Коэффициент заполнения торосов шельфа о. Сахалин в 1998 году по данным электротермобурения составил 0,78 (парус – 0,93, киль – 0,77), коэффициент заполнения стамух – 0,88 (парус – 0,97, киль – 0,86). Средний характерный линейный размер полости в стамухах составлял 20 см, в торосах – 33 см.

На совместном графике двух распределений объемного содержания твердой фазы льда по глубине для торосов Печорского моря и торосов шельфа о. Сахалин в диапазоне глубин –400...–650 см зависимости практически повторяют друг друга. Два расположенных рядом локальных максимума распределения (см. рис. 3(а)) говорят о наличии на этой глубине плотного льда, предположительно консолидированного льда молодых торосов, оказавшегося там в результате процессов вторичного торосообразования. По сообщению Тышко К.П. под действием тяжести обломков торосающегося льда наложенный консолидированный лед молодых торосов притапливается и остается на глубине.

Во втором разделе главы рассмотрены результаты исследования в 1999 году внутреннего строения торосов Печорского

моря. Всего было получено 78 записей скорости бурения скважин на 13 различных торосах. Приведены основные характеристики изученных торосов. Для данного года соотношение плотного льда, рыхлого льда и пустот в среднестатистическом однолетнем торосе – 33/50/17 %. Процентное содержание плотного, рыхлого льда и пустот в парусе в среднем составляло 57/25/18, в киле – 29/54/17.

Распределение объемного содержания твердой фазы льда для среднестатистического однолетнего тороса Печорского моря рассмотрено в качестве примера в главе 3 и приведено на рис. 3. Согласно этому распределению, толщину КС можно оценить в 55-56 см. Это существенно

отличается от приводимого в литературе среднего значения толщины КС, находящегося по многолетним данным в диапазоне 200...300 см. Однако, КС такой толщины составил бы около одной трети от средней общей толщины торосов, что вызывает сомнение. Согласно приводимым в литературе расчетам толщина КС в 1,5-3 раза больше толщины ровного льда. По результатам исследований с участием автора (всего исследован 41 торос и 18 стамух) толщина КС в некоторых точках превышала толщину ровного льда более чем в 4 раза. Однако среднее значение толщины КС превышало толщину ровного льда в среднем в 1,1 раза, максимум в 2,1 раза. На основе проведенного анализа внутреннего строения торосов и стамух шельфа о. Сахалин и Печорского моря сделан вывод, что толщина консолидированного слоя, определяемая по скорости термобурения по субъективным ощущениям оператора, часто является завышенной. К тому же возникает ошибка из-за методики определения нижней границы консолидированного слоя по расположению первого встретившегося ниже уровня воды провала термобура.

В третьем разделе главы рассмотрены результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух Каспийского моря в зависимости от ледовых условий, от аномально легких до среднесноголетних с тенденцией к более тяжёлым условиям.

Характерной особенностью исследованных стамух было отсутствие в них сплошного консолидированного слоя. КС представлял собой отдельные линзы различных размеров. По данным 2001-2004 гг. средний коэффициент заполнения стамух составил 87 %. Средний характерный размер полости в стамухах

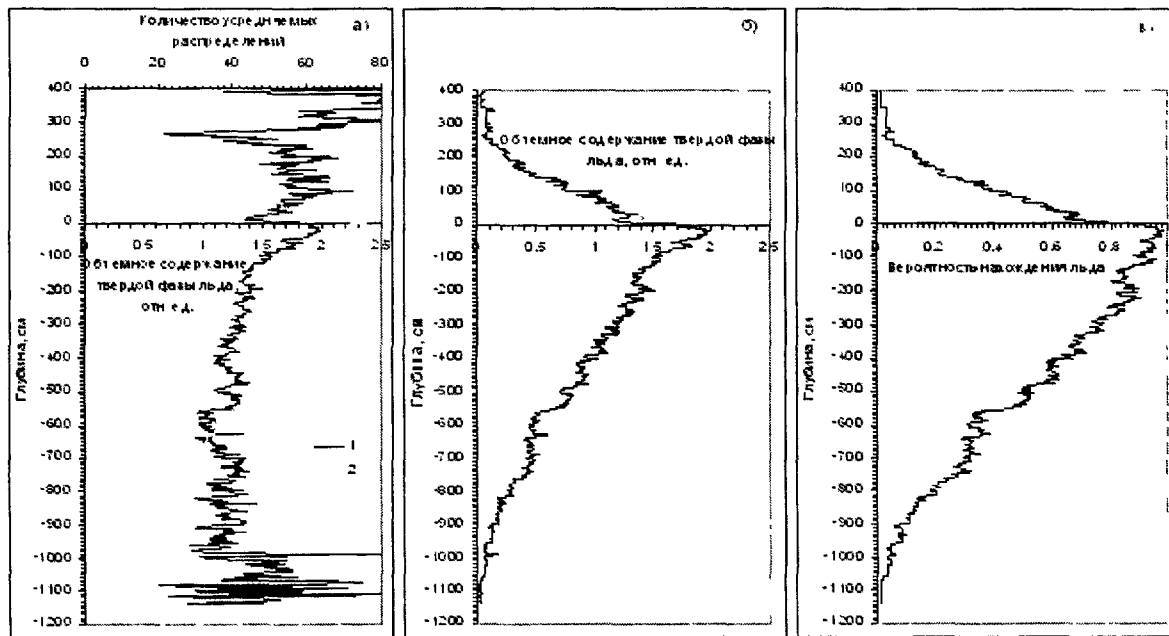


Рис. 3– Распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине для среднестатистического тороса и вероятность нахождения льда (по данным термобурения торосов Печорского моря в 1999 г).

а) количество усредняемых распределений на разной глубине различно (1 – объемное содержание твердой фазы льда, 2 – количество усредняемых распределений); б) количество усредняемых распределений на разной глубине одинаково (в тех точках, где рассматриваемая глубина выходит за пределы паруса или киля, объемное содержание принимается равным нулю); в) вероятность нахождения льда.

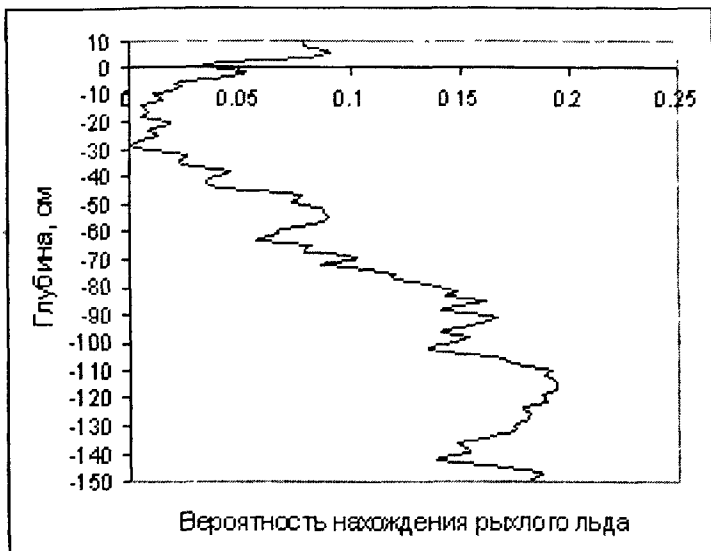


Рис. 4– Фрагмент распределения вероятности наличия рыхлого льда по глубине (по данным электротермобурения торосов Печорского моря в 1999 году).

составил 21 см, в торосах – 24 см. В то же время содержание плотного льда в стамухах и торосах было примерно одинаково – 22,1 и 22,4 %.

Кoeffициент корреляции средних за сезон коoeffициента заполнения стамух и средней толщины КС стамух составил 0,8. Среднее отношение толщины КС к общей толщине стамухи имеет наибольшее значение 0,2 при аномально легких ледовых условиях и наименьшее – 0,06 – при близких к среднемноголетним с тенденцией к более тяжёлым.

Среднее значение толщины КС торосов по термобуровым данным 2003 г. равнялось 35 см, по данным 2005 г. – 55 см. Отношение средней толщины КС к средней толщине ровного льда в 2003 г. было 1,5, в 2005 г. – 1,4. Отношение средней толщины КС к средней толщине ледяных блоков, слагающих гряды торосов, в 2003 г. равнялось 1,3, в 2005 г. – 5,5.

Коэффициент заполнения торосов Каспийского моря по данным водяного бурения в 2003 г. составил 0,83 (парус – 0,89, киль – 0,82), по данным электротермобурения в 2005 г. – 0,86 (парус – 0,83, киль – 0,87).

В четвертом разделе главы рассмотрены результаты исследования в сентябре 2004 г. и в апреле 2005 г. внутреннего строения торосов Арктического бассейна. Приведены основные морфометрические характеристики исследованных торосов. Обнаружено отличие скорости бурения тороса в апреле от бурения тех же точек в сентябре, заключающееся в том, что в сентябре 2004 г. скорость бурения в некоторых скважинах по мере заглубления термобура в киль тороса приобретала скачкообразный характер с все более увеличивающейся амплитудой. Это связано с тем, что торос исследовался в период окончания летнего таяния, в течение которого талая пресная вода попадает под лед, и во льду килля находилось большое количество крупных пор и каверн. Все три исследованных тороса имели практически одинаковый коэффициент заполнения – 0,86...0,88. Соотношение «средняя высота паруса – средняя глубина килля» для первого тороса около 1/4, а для второго и третьего – ближе к 1/10. В киле торосов присутствовали большие пустоты (длина участка пустоты более 200 см, а в одной из скважин – 327 см).

Обнаружено, что средняя толщина консолидированного слоя одного из торосов существенно меньше толщины окружающего торос ровного льда, составляющей в среднем 215 см. Отношение «КС / ровный лед» равнялось 0,18. В данном случае повлияли условия формирования тороса, а также то обстоятельство, что торос, возможно, не подвергался воздействию низких отрицательных температур.

Распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине в сентябре 2004 г. показало наличие тонкого слоя плотного льда на уровне воды. Предположительно, это пресный лед, образовавшийся в результате замерзания снежиц. Заметно выделяется на распределении слой ровного льда, пористость которого уменьшается с глубиной.

Приведено распределение температуры вдоль скважины в апреле 2005 г. Температура ниже уровня воды установилась и не зависит от колебаний температуры воздуха. В данной точке ниже

глубины –350 см наблюдается гомотермия, что указывает на расположение на этой глубине нижней границы КС. Верхняя граница КС в этой точке определена по записи скорости и располагается на горизонте 1 см.

В пятом разделе главы рассмотрены результаты исследования в феврале 2005 г. внутреннего строения торосов Азовского моря. Всего было пробурено 35 скважин на двух грядах торосов с записью параметров бурения и 38 скважин на ровном льду. Средняя толщина ровного льда составила 36 см. Среднее значение толщины консолидированного слоя равнялось 29 см. Отношение средней толщины КС к средней толщине ледяных блоков, слагающих гряды торосов, равнялось 4,0. Пористость киля среднестатистического тороса уменьшалась с глубиной, что отличало торосы Азовского моря от торосов других регионов. Коэффициент корреляции толщины КС и величины паруса тороса равнялся $-0,66$, толщины КС и общей толщины тороса равнялся $-0,65$. Отношение средней толщины КС к средней толщине ровного льда равнялось 0,8. Коэффициент заполнения торосов равнялся 0,72 и в среднем был на 13 % меньше, чем в других регионах. Это связано с тем, что промежутки между блоками льда в киях торосов часто заполнены шугой, которая препятствует плотной упаковке блоков. Коэффициент заполнения парусов торосов в целом меньше, чем килей (0,70 и 0,73 соответственно). Здесь свой вклад вносит КС, отношение толщины которого к общей толщине тороса больше, чем в других регионах.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Усовершенствована существующая математическая модель контактного плавления с целью применения ее к расчету параметров электротермобурения соленого льда.

2. Предложена методика определения по записи скорости погружения термобура границ участков плотного льда, рыхлого льда и пустот при тепловом бурении торосов и стамух.

3. Предложена методика определения границ консолидированного слоя по записи скорости бурения и измерения давления воды в скважине.

4. Предложены методические основы определения по результатам усреднения данных термобурения обобщенных характеристик внутреннего строения торосов и стамух.

К значимым результатам работы можно отнести следующие:

1. Определены к.п.д. нагревательных коронок электротермобура ААНИИ, оценены их численные значения, выявлены их зависимости от параметров бурения и физических характеристик льда. С использованием полученных значений к.п.д. произведен численный расчет зависимости скорости бурения от электрической мощности, веса бура и физических характеристик льда.

2. При участии автора разработаны, изготовлены и в течение ряда лет успешно эксплуатируются установки для водяного и электротермобурения льда с записью параметров бурения.

3. Разработана технология бурения с записью параметров бурения на компьютер.

4. Предложена методика определения границы льда и грунта по записи скорости бурения стамух.

5. Впервые при участии автора исследованы торосы Таганрогского залива Азовского моря. Определены их морфометрические характеристики и внутреннее строение.

6. На основе проведенного анализа внутреннего строения торосов и стамух шельфа о. Сахалин и Печорского моря сделан вывод, что толщина консолидированного слоя, определяемая по скорости термобурения по субъективным ощущениям оператора, часто является завышенной. Сказывается также методическая ошибка, возникающая из-за методики определения нижней границы консолидированного слоя по расположению первого встретившегося ниже уровня воды провала термобура.

7. Впервые с помощью методики определения границ консолидированного льда по записи скорости бурения и измерения давления воды в скважине выявлено аномально низкое отношение средней толщины консолидированного слоя двухлетнего тороса Арктического бассейна к толщине окружающего торос ровного льда – 0,18.

8. Обнаружено, что в кляях однолетних торосов Печорского моря и шельфа о. Сахалин на глубине –400...–650 см присутствуют блоки плотного льда, предположительно наслоенного консолидированного льда молодых торосов, оказавшиеся там в результате процессов вторичного торосообразования.

9. Выявлена зависимость среднего отношения толщины консолидированного слоя к общей толщине стамухи Каспийского

моря от ледовых условий. Среднее отношение имеет наибольшее значение 0,20 при аномально легких ледовых условиях и наименьшее – 0,06 – при близких к среднемноголетним с тенденцией к более тяжёлым ледовым условиям.

10. В нижней части килей некоторых торосов в конце летнего таяния встречаются зоны льда высокой пористости, обусловленной попаданием пресной воды. Исследование внутреннего строения двухлетних торосов Арктического бассейна подтвердили этот ранее известный, но мало изученный факт. Линейная пористость такого льда, оцененная по скорости бурения, составляет 17-22 %.

11. Более отвечающее действительности и, следовательно, предпочтительнее будет разделение тороса или стамухи на следующие фракции: плотный лед, лед высокой пористости, отдельные мелкие куски льда или наслоенный тонкий лед, шуга, пустоты.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Миронов Е.У., Морев В.А., Порубаев В.С., Тюряков А.Б., Харитонов В.В. Метод водяного термобурения для исследования внутренней структуры ледяных образований // Труды РАО. Санкт-Петербург, Россия, 16-18 сентября 2003, с.247-252.

2. Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определения структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент России № 2153070 от 20.07.2000. Бюллетень № 20.

3. Смирнов В.Н., Шейкин И.Б., Шушлебин А.И., Харитонов В.В., К. Кросдайл, М. Метч, Р. Ритч, Поломошнов А.М., Сурков Г.А., А. Ванг, Бекецкий С.П., Дж. Уивер. Измерения крупномасштабной прочности торосов: Сахалин 1998 // Труды шестой Международной конференции по судам и морским конструкциям в холодных регионах. С.-Петербург, Россия, 12-14 сент. 2000. С. 512-518.

4. Шейкин И.Б., Харитонов В.В. Метод построения стохастической модели тороса по данным термобурения: Тезисы докладов итоговой сессии Ученого совета ААНИИ по результатам работ 1996-1998 гг. Санкт-Петербург, 1999. –С. 26-27.

5. Victor V. Kharitonov Peculiarities Of Fractional Composition Of The Pechora Sea First-Year Ridges. Proc. of the 18th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC). Potsdam, New York, 26-30 June 2005, Vol.2, p 907-916.

6. Victor V. Kharitonov and Valentin A. Morev. Research Of The Internal Structure Of Ridges In The Central Arctic By Electrothermal Drilling Method. Proc. of the 18th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC) Potsdam, New York, 26-30 June 2005, Vol.2, p. 917-926.

7. Ye.U. Mironov, V.A. Morev, V.S. Porubaev, V.V. Kharitonov. Study of Geometry and Internal Structure of Ice Ridges and Stamukhas using Thermal Water Drilling. Proc. of the 17th Int. Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway, June 16-19, 2003, p. 623-634.

8. V. Morev, V. Kharitonov. Definition of the Internal Structure of Large Ice Features by Thermal Drilling Methods Proc. of the 16th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Condition. POAC'01. Aug. 12-17, 2001 Ottawa, Ontario, Canada. Vol.3, p.1465-1472.

№ 16870

РНБ Русский фонд

2006-4

12563

Ротопринт ААНИИ
Траж 100 экз. Заказ №20
17.09.2005 г.