

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ
ИМ. М. А. ЛАВРЕНТЬЕВА

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

2 – 9 июня 2012 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск
2012

Актуальность проведения научно-исследовательских работ в области взаимодействия материалов и конструкций с окружающей средой в условия Арктики определяется потребностями развития северных территорий. В связи с изменением климата возможно появление новых перспектив для развития ряда отраслей народного хозяйства в северных и приполярных областях: геологоразведка и добыча полезных ископаемых на арктическом шельфе, судоходство и т.д. Это обуславливает необходимость проведения фундаментальных, прикладных и инженерно-технических исследований для создания методик прогнозирования и управления явлениями, специфическими для арктической зоны, на стадии разработки новых технологий. Целью Всероссийской конференции "Полярная механика — 2012" является обсуждение результатов научных исследований, выполненных в различных научных и научно-технических коллективах, а также определение наиболее приоритетных научных и инженерных направлений исследований.

Тематика конференции включает следующие направления:

- Взаимодействие льда, в том числе подвижного ледяного покрова с плавающими и закрепленными конструкциями (деформации конструкций, влияние волнения, вопросы динамики плавающих объектов в ледовых морях).
- Трубопроводный транспорт. Влияние температурного режима на процессы транспортировки нефти и газа (образование твердой и смешанной фаз за счет примесей, выпадение парафина и т.д.).
- Геологоразведка в полярных областях. Прохождение сейсмических волн в слоистых средах с ледовыми включениями. Возможность сейсморазведки с поверхности льда.
- Механика льда и мерзлых грунтов. Механические свойства льда, возможность его использования как конструкционного материала, свойства мерзлых грунтов, процессы оттаивания и их влияние на конструкции.

Оргкомитет конференции выражает благодарность за финансовую поддержку Технологической компании Schlumberger и Российскому фонду фундаментальных исследований (проект № 12-01-06033-г).

Содержание

<i>Алексеев Г. В., Гренкин Г. В.</i> ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ АКУСТИКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ	7
<i>Аннин Б. Д., Чиркунов Ю. А., Бельмечев Н. Ф.</i> О ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ МОДЕЛИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ	8
<i>Апполонов Е. М., Добродеев А. А., Клементьева Н. Ю., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я.</i> НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ ШИРОКОГО КАНАЛА ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОХОДА КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ	9
<i>Апполонов Е. М., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я.</i> Роль МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В РАЗВИТИИ МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКИ	10
<i>Беляшов В. А., Сазонов К. Е.</i> НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	11
<i>Бойко М. Е., Шарков М. Д., Бойко А. М., Иванова Т. И., Курсков А. В., Веселов В. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТАЛОЙ ВОДЫ И КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ МЕТОДОМ МУРР . .	11
<i>Бондарев Э. А., Рожин И. И., Аргунова К. К.</i> ВЛИЯНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ДОБЫЧУ ГАЗА В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИН	13
<i>Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ	13
<i>Васильев А. А.</i> ВЗРЫВООПАСНОСТЬ МЕТАНОГИДРАТОВ	15
<i>Васильев А. А.</i> ВОЛНА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВОДА-ЛЕД КАК ВОЛНА “ГОРЕНИЯ”	15
<i>Васильев Н. К., Иванов А. А., Шаталина И. Н.</i> МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ И АРМИРОВАНИЯ ЛЬДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛЕДЯНЫХ И ЛЬДОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ	16
<i>Глазырин В. П., Зефиров С. В., Кочетков А. В., Крылов С. В., Орлов М. Ю., Орлов Ю. Н., Повереннов Е. Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА И МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПРИ УДАРНО-ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	17
<i>Глазырин В. П., Орлов М. Ю., Орлова Ю. Н.</i> АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	18
<i>Гольдштейн Р. В., Епифанов В. П.</i> АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ	19
<i>Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М.</i> МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА И НЕКОТОРЫЕ ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ	20
<i>Горельский В. А., Коняев А. А., Толкачев В. Ф.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ В ПРЕСНЫЙ ЛЕД ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $0 \div -25^{\circ}\text{C}$	21

<i>Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н.</i> РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ ГАЗОГИДРАТОМ ИЛИ ЛЬДОМ	22
<i>Добродеев А. А., Сазонов К. Е.</i> Движения судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей	23
<i>Епифанов В. П., Соловьев Н. Г.</i> МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	23
<i>Ерманюк Е. В., Гаврилов Н. В.</i> Об одном механизме засева перехлажденной жидкости микропузырьками	24
<i>Земляк В. Л., Козин В. М.</i> Исследование волнового сопротивления подводного судна при движении под ледяным покровом	25
<i>Иванова И. К., Шиц Е. Ю.</i> Исследование парафиновых отложений и способов их ликвидации на месторождениях Западной Якутии	26
<i>Иванова И. К., Шиц Е. Ю.</i> Кинетические исследования модельных процессов растворения отложений парафина в бинарной системе Гексан – бензол в интервале температур от 10 до 60°C	27
<i>Клементьева Н. Ю., Сазонов К. Е.</i> Экспериментальные исследования динамики заякоренных инженерных сооружений под действием ледовой нагрузки	28
<i>Козин В. М., Верещагин В. Ю.</i> Влияние снежного покрова на параметры изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых в ледяному покрове	29
<i>Колесников Ю. И., Федин К. В., Каргаполов А. А.</i> О диагностировании потери устойчивости опор трубопроводов по акустическим шумам	30
<i>Коробкин А. А., Костиков В. К., Макаренко Н. И.</i> Неустановившееся движение эллиптического цилиндра под ледовым покровом	31
<i>Коробкин А. А., Шишмарев К. А.</i> Волновое движение воды в трехмерном канале, покрытом льдом	32
<i>Кузьмин Г. П.</i> ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	32
<i>Лабутин В. Н., Марков В. С.</i> Экспериментальные исследования ударного разрушения многолетнемерзлых горных пород	33
<i>Левин Б. В., Доманский А. В., Сасорова Е. В.</i> О сейсмичности и механике полярных областей	35
<i>Леган М. А.</i> Хрупкое разрушение элементов конструкций с концентраторами напряжений	36
<i>Лукин Е. С., Петрова Н. Д., Иванов А. М.</i> Повышение хладостойкости конструкционных сталей, упрочненных методом РКУП	37

<i>Матвеев А.Д.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЕТОЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	38
<i>Медведев Д.А., Ершов А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМЕРЗАНИЯ ЛЬДА НА ПОДВОДНОЙ ТРУБЕ ГАЗОПРОВОДА	39
<i>Морозов Е.Г., Марченко А.В., Музылев С.В.</i> Волны подо льдом в АРКТИЧЕСКОМ ФИОРДЕ	40
<i>Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л.</i> Численное исследование процесса протаивания многолетних мёрзлых пород при работе добывающей скважины с установкой электроцентробежных насосов	40
<i>Огородов С.А., Архипов В.В., Барабанская А.В., Вергун А.П., Кокин О.В., Марченко А.В., Цвецинский А.С.</i> СОВРЕМЕННЫЙ ЛЕДОВО-ЭКЗАРАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ НА ШЕЛЬФЕ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА	41
<i>Папин А.А., Токарева М.А.</i> Динамика тающего деформируемого снежно-ледового покрова	43
<i>Пеньковский В.И., Корсакова Н.К.</i> Абляция диапиров и массивов мерзлоты в потоке жидкости	43
<i>Петрова А.Г., Коробкин А.А.</i> Моделирование сегрегации парофизов в подводных нефтепроводах	45
<i>Попов С.Н., Герасимов А.И.</i> РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ НАДЛЕДНЫХ МОСТОВ	46
<i>Raputa B. Ф.</i> Экспериментальные и численные исследования аэрозольных выпадений примесей в окрестностях нефтегазового факела	47
<i>Решетова Г.В., Хайдуков В.Г., Чеверда В.А.</i> Волновые процессы в “транзитных зонах”	48
<i>Семенов М.Е., Шиц Е.Ю.</i> Получение метангидратов в статических условиях	50
<i>Семенов Х.Н., Петров В.Н.</i> Деформационные процессы и разрушение высоконапряженных конструкций в условиях СЕВЕРА и Арктики	51
<i>Сергеева А.М., Ткачева А.В.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СУДАМИ ЛЕДОВОГО КЛАССА	51
<i>Смирнов В.Н.</i> Крупномасштабная механика и динамика морских льдов	53
<i>Стурова И.В.</i> Гидродинамические нагрузки, действующие на погруженное тело при движении под ледяным покровом	54
<i>Тананаев Н.И.</i> Принципы управления мерзлотными условиями в руслах рек криолитозоны при организации гидротехнических мероприятий	55
<i>Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В.</i> Деформация ледового покрова озера Байкал при климатических и приливных воздействиях	56

<i>Тимофеев О. Я., Степанов И. В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАКЛАДКИ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА В ДОННЫЙ ГРУНТ С ИНТЕНСИВНОЙ ЛЕДОВОЙ ЭКЗАРАЦИЕЙ	57
<i>Ткачева Л. А.</i> ПАДЕНИЕ ТЕЛА С ПЛОСКИМ ДНОМ НА ТОНКИЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ	57
<i>Хабиров С. В.</i> РАЗРАБОТКА ГАЗОГИДРАТОВ СОВРЕМЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ	59
<i>Харламов С. Н., Альгинов Р. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ВЯЗКИХ СРЕД В СОЧЛЕНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ	60
<i>Хлуднев А. М.</i> ПРОБЛЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ НАЛИЧИИ ВКЛЮЧЕНИЙ И ТРЕЩИН	61
<i>Цуприк В. Г.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА	62
<i>Шлычков В. А.</i> ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОХОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ	63
<i>Шушаков О. А., Марьясов А. Г., Nedwed T. J., Srnka L. J., Thomann H.</i> ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ПОДО ЛЬДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА	64
Авторский указатель	66

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ АКУСТИКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Г. В. Алексеев¹, Г. В. Гренкин²

¹Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

При исследовании процессов распространения звуковых волн в слоистых средах с ледовыми включениями часто используются модели акустики анизотропной среды. В данной работе исследуются обратные задачи для линейной скалярной модели акустики анизотропной среды, описываемой соотношениями (см. [1])

$$\nabla p = i\omega\rho_0\tilde{\rho}(\mathbf{x})\mathbf{v} + \rho_0\tilde{\rho}(\mathbf{x})\mathbf{F}, \quad i\omega\rho = \lambda_0\lambda(\mathbf{x})\operatorname{div} \mathbf{v}.$$

Здесь p — звуковое давление, \mathbf{v} — вектор колебательной скорости частиц жидкой среды, $\tilde{\rho}(\mathbf{x})$ — переменный тензор плотности анизотропной среды, $\lambda(\mathbf{x})$ — переменный коэффициент сжимаемости.

Рассматриваемые модели содержат ряд параметров, описывающих свойства рассматриваемой анизотропной среды, а также плотности объемных источников создаваемого звукового поля. Для определения картины звукового поля в рассматриваемой области эти параметры должны быть заданы вместе с соответствующими граничными условиями. Вместе с тем на практике некоторые из этих параметров могут быть неизвестны и их требуется определить вместе с решением по некоторой дополнительной информации. На этом пути возникают обратные задачи для рассматриваемых моделей. Они заключаются в нахождении искомых параметров и решения по заданной информации о решении. Особую трудность вызывает исследование коэффициентных обратных задач для указанных моделей, поскольку по своим постановкам они относятся к нелинейным и, как правило, некорректным задачам математической физики.

В настоящей работе для исследования коэффициентных обратных задач для модели анизотропной акустики применяется подход, основанный на их сведении к соответствующей задаче управления. Он заключается во введении функционала качества, адекватно отвечающего рассматриваемой обратной задаче, и сведении исходной обратной задачи к задаче минимизации указанного функционала качества. Последнее позволяет применять для ее решения хорошо развитые методы условной оптимизации. На основе указанного подхода исследуется единственность и устойчивость решений обратных задач и разрабатывается эффективный численный алгоритм их решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-01-00219-а) и гранта ДВО РАН (код проекта 12-І-П17-03).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г. В., Романов В. Г. *Об одном классе нерассеивающих акустических оболочек для модели анизотропной акустики*. Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т. 14. № 2. С. 15–20.

О ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ УПРУГОЙ МОДЕЛИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Б. Д. Аннин¹, Ю. А. Чиркунов², Н. Ф. Бельмечев²

¹ Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет

Для описания упругого деформирования горных пород часто используют модель трансверсально-изотропного упругого тела, позволяющую описывать поведение материалов, обладающих анизотропией упругих свойств [1, 2]. Для данной модели связь компонент тензора напряжений σ^{ij} и тензора деформаций ε^{ij} в декартовой системе координат $\mathbf{x} = (x^1, x^2, x^3)^T \in R^3$ представляется в виде [2]

$$\begin{aligned}\sigma^{11} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon^{11} + \lambda\varepsilon^{22} + \lambda'\varepsilon^{33}, \sigma^{12} = 2\mu\varepsilon^{12}, \sigma^{22} = \lambda\varepsilon^{11} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon^{22} + \lambda'\varepsilon^{33}, \\ \sigma^{13} &= 2G'\varepsilon^{13}, \sigma^{23} = 2G'\varepsilon^{23}, \sigma^{33} = \lambda'(\varepsilon^{11} + \varepsilon^{22}) + (\lambda' + 2\mu')\varepsilon^{33}.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $\lambda, \mu, \lambda', \mu', G'$ — независимые параметры тензора модулей упругости трансверсально-изотропного тела; компоненты тензора деформаций выражаются через компоненты вектора перемещений $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x^1, x^2, x^3, t) \in R^3$ по формулам: $2\varepsilon^{ij} = u_{xj}^i + u_{xi}^j$, ($i, j = 1, 2, 3$), t — время.

Если в (1) положить $\lambda' = \lambda + 2\mu - 2G'$, $\mu' = G'$, то уравнения для (1) примут вид

$$\mathbf{u}_{tt} - (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \times \left(\begin{pmatrix} G' & 0 & 0 \\ 0 & G' & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \cdot (\nabla \times \mathbf{u}) \right) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Методами группового анализа [3, 4, 5] получена и исследована эквивалентная система (2) система линейных дифференциальных уравнений первого порядка, с помощью которой найдены некоторые точные решения уравнений (2). Указан физический смысл этих решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-01-12075-офи-м-2011; гранта № НШ 6706.2012.1 в рамках Программы Президента РФ по поддержке ведущих научных школ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аннин Б.Д., Остробабин Н.И. *Анизотропия упругих свойств материалов// Прикл. механика и техн. физика.* Новосибирск. 2009. Т. 49, № 6. С. 131–151.
2. Аннин Б.Д. *Трансверсально-изотропная упругая модель геоматериалов// Сиб. журн. индустр. матем.* 2009. Т. 12, № 3(39). С. 5–14.
3. Овсянников Л.В. *Групповой анализ дифференциальных уравнений.* М.: Наука. 1978.
4. Чиркунов Ю.А. *Групповой анализ линейных и квазилинейных дифференциальных уравнений.* Новосибирск: НГУЭУ. 2007.

5. Чиркунов Ю. А. *Групповое расслоение уравнений Ламе классической динамической теории упругости* // Известия АН. Механика твердого тела. 2009. № 3. С. 47.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ ШИРОКОГО КАНАЛА ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПРОХОДА КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ

*Е. М. Апполонов, А. А. Добродеев, Н. Ю. Клементьев, К. Е. Сазонов,
О. Я. Тимофеев*

ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, Санкт-Петербург

Одной из важнейших задач, стоящих перед отечественным морским флотом и судостроением, является создание эффективных транспортных систем, обеспечивающих бесперебойный и безопасный вывоз углеводородного сырья из районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, а также транзитные плавания в Северном Ледовитом океане. Многочисленные исследования показывают, что эффективность транспортной системы существенным образом зависит от дедвейта используемых транспортных судов, что определяет необходимость обеспечения плавания во льдах крупнотоннажных судов.

Возможное решение проблемы, предложенное во ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, представляет собой ледокол принципиально нового архитектурного типа, который может создавать ледяной канал шириной более 50 м, причем работа ледокола осуществляется при потреблении относительно небольшого уровня мощности. Предлагаемый ледокол представляет собой три или четыре ледокольных корпуса, установленных на единой платформе. Особенностью корпусов является то, что они имеют относительно небольшие размеры, и каждый из них сопоставим с корпусом среднего или малого ледокола. На каждом из корпусов установлено по одному движителю, причем на головном и замыкающем корпусах это могут быть винто-рулевые колонки, средние корпуса оборудованы традиционными гребными винтами.

Важной особенностью предлагаемого решения является взаимное расположение отдельных корпусов ледокола друг относительно друга. Для нового ледокола предложено такое взаимное расположение корпусов, которое позволяет не только создавать широкий канал, но и снизить ледовое сопротивление.

Новое техническое решение было сформулировано на основании анализа данных различных модельных экспериментов в ледовом опытном бассейне, а также на основании теоретических расчетов. В докладе приводятся некоторые результаты экспериментального исследования нового ледокола.

РОЛЬ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В РАЗВИТИИ МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКИ

Е. М. Апполонов, К. Е. Сазонов, О. Я. Тимофеев

ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, Санкт-Петербург

Развитие морской ледотехники началось одновременно с появлением первых ледоколов во второй половине XIX века. Создание нового типа судов поставило перед судовладельцами и корабелами целый ряд вопросов, для поиска ответов на которые аккумулировался опыт эксплуатации первых ледоколов, вырабатывались рекомендации по тактике ледового плавания, эволюционным путем осуществлялся поиск наиболее рациональных технических решений, в том числе и по форме корпуса.

Долгое время вплоть до середины 50-х годов прошлого века развитие морской ледотехники осуществлялось в двух слабо взаимодействующих друг с другом направлениях. Одно из направлений было связано с накоплением и анализом эмпирической информации, получаемой при эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания, так и при проведении натурных испытаний. Надо иметь в виду, что получаемая таким образом информация была получена в формате “мощность–скорость”. Выбор именно этого формата определялся не преодолимыми в то время трудностями, связанными с измерением ледового сопротивления.

Вторым направлением было теоретическое изучение различных аспектов взаимодействия судов со льдом. При этом в основном использовался силовой подход при решении соответствующих задач механики. Результаты теоретических исследований не оказывали существенного влияния на развитие ледокольной техники.

Качественные изменения в развитии морской ледотехники произошли в 1955 г., когда в Ленинграде в Арктическом институте был создан первый в мире ледовый бассейн. Благодаря модельному эксперименту, стало, наконец, возможным непосредственное изучение ледового сопротивления. Одним из важнейших результатов, полученных в первые годы работы бассейна, стал вывод о возможности разделения ледового сопротивления на различные составляющие. Это важнейшее положение было обосновано экспериментальными данными. Разделение полного ледового сопротивления на составляющие открыло путь к построению различных расчетных методов. Модельный эксперимент позволил проводить оптимизацию корпуса проектируемого судна по критерию минимизации ледового сопротивления, т. е. без учета особенностей работы пропульсивной установки. Такой подход существенно упростил задачу поиска оптимальной для данного проекта формы корпуса.

Эксплуатация первого в мире ледового бассейна показала большую перспективность применения модельных исследований при изучении различных проблем, возникающих в морской ледотехнике. Необходимость проведения модельных исследований процессов взаимодействия инженерных судов и инженерных сооружений со льдом была осознана во всем мире. Технологии модельных испытаний развиваются уже более пятидесяти лет. Развитие технологий осуществляется в нескольких взаимосвязанных направлениях:

— разработка новой экспериментальной техники, включая проектирование новых ледовых бассейнов;

- разработка методик приготовления моделированного льда, наилучшим образом воспроизводящего физические свойства натурного ледяного покрова;
- разработка методов моделирования и имитации в ледовом бассейне разнообразных естественных ледовых условий;
- разработка новых методик проведения модельных экспериментов с перспективными образцами морской техники, включая эксперименты, направленные на апробацию и тестирование компьютерных программ.

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

B. A. Беляшов, K. E. Сазонов

ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, Санкт-Петербург

Натурные испытания судов необходимы для проверки правильности принятых на стадии проектирования технических решений. На основании данных натурного эксперимента можно оценить качество научных прогнозов, выполненных на основании проведения модельных экспериментов в ледовых бассейнах, а также на основании теоретических расчетов.

В последние годы специалисты ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова” практически ежегодно проводят натурные исследования различных ледоколов и судов ледового плавания. Натурную проверку прошли практически все суда, при проектировании которых использовались данные, полученные в ледовом бассейне института.

В докладе описана современная методика проведения натурных испытаний судов, а также выполнено сопоставление результатов модельных и натурных экспериментов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТАЛОЙ ВОДЫ И КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ МЕТОДОМ МУРР

*M. E. Бойко¹, M.Д. Шарков¹, A.М. Бойко¹, T.I. Иванова², A. B. Курсков²,
B.A. Веселов²*

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

²*НПО "Буревестник" Санкт-Петербург*

Было проведено исследование спектров малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) воды и колloidных растворов металлов на установке ДРОН-8 производства НПО "Буревестник" (вертикальная Theta-Theta геометрия) при комнатной

температура и на модифицированной низкотемпературной приставке УРНТ-180 к гoniометру ГУР-8 (горизонтальная геометрия) на источнике рентгеновского излучения Rigaku-Ultrax-18HB.

В качестве образца использовалась дистиллированная вода высокой очистки в линзе толщиной 3 мм между пленками лавсана. В процессе регистрации данных МУРР поддерживалась температура образцов с точностью лучше 0.1 С при помощи меди-константной дифференциальной термопары. Интервалы температур составляли: от -10°C до 1.0°C; от +0.1°C до +5°C; от +4°C до 20°C; от 20°C до -0.1°C.

Разбавленные коллоидные растворы серебра (до 1–10 мг/л) давали картину МУРР, характерную для распределения частиц жидкостного типа. В частности, наблюдались уширение первичного пика в т.н. областях Гинье и Порода и слабый размерный брэгговский пик. Анализ полученных кривых МУРР позволяет утверждать, что кластеры коллоидных частиц имеют размер от 2 нм до 6 нм (в зависимости от режима получения коллоидов) и распределяются в растворе приблизительно равномерно, на расстояниях друг от друга в десятки нанометров. Наблюдения кластеров в электронном микроскопе давали значительно большие размеры. Это можно объяснить тем, что при высушивании раствора частицы слипаются в комки.

Исследования МУРР около 0°C показали наличие сверхструктурного фазового перехода льда при температуре около +0.2°C. Подтверждена гипотеза о разбиении монолитного льда на ледяные кластеры, разделенные доменными стенками. Это проявляется в сверхструктурных брэгговских пиках на углах рассеяния рентгеновских лучей порядка угловой минуты, соответствующих величинам 80–100 нанометров.

Данные МУРР, полученные в процессе таяния льда и кристаллизации воды, свидетельствуют о гистерезисном характере процесса таяния–кристаллизации H₂O.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свергун Д.И., Фейгин Л.А. *Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние*. М.: Наука, 1986.
2. Boiko M. E. *Studying the Temperature Dependence of Incommensurate Domains in Mercury Halides and Gallium Nitride Thick Films*. Inst. Phys. Conf. Ser. 1998. Vol. 155. P. 985–988.
3. Boiko M. E., Boiko A. M. *Advantages in the Small-Angle Scattering of X-Ray for Studying Optoelectronic Devices within the Frames of ISTC Projects*. Key Engineering Materials. 2010. Vol. 437. P. 641–645.

ВЛИЯНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ДОБЫЧУ ГАЗА В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИН

Э. А. Бондарев, И. И. Рожин, К. К. Аргунова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск

В вычислительном эксперименте исследовано влияние параметров математической модели (интенсивность отбора и состав газа, пластовые температура и давление, проницаемость пласта) на динамику полей давления и температуры при неизотермической фильтрации несовершенного газа в пласте. Для описания процесса использовалась нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных, полученная из законов сохранения массы и энергии и закона Дарси, а в качестве замыкающих соотношений — физическое и калорическое уравнения состояния. Границные условия соответствуют отбору газа при заданном давлении на забое скважины. Оценивалось влияние предположения о изотермичности процесса фильтрации на поле давления и на суммарную добычу газа. Показано, что влияние неизотермичности процесса на такие интегральные характеристики, как суммарная добыча, наиболее существенно при умеренных темпах отбора. На конкретных примерах газовых месторождений северо-востока России путем сравнения полей давления и температуры с равновесными условиями образования гидратов определен размер возможной зоны гидратообразования в призабойной зоне скважин.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Н. А. Ваганова, М. Ю. Филимонов

Институт математики и механики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

Многолетнемерзлые породы (ММП) занимают около 25% всей суши земного шара (в основном это Аляска, части северных территорий Канады, России, высокогорные области Китая) и очень подвержены внешним воздействиям. Слагающие ММП породы имеют различные физико-химические свойства, которые могут изменяться по всем направлениям. В летнее время, в силу положительных температур воздуха и солнечного излучения, происходит сезонное оттаивание верхнего слоя грунта, в зимнее время наблюдается обратный процесс.

Разработана новая математическая модель распространения тепла в ММП с учетом различных климатических и физических факторов. К первой группе факторов

относится учет солнечного излучения, сезонное изменение температуры воздуха, возможный снежный покров и др. Ко второй группе факторов, учтенных в предлагаемой модели, относятся неоднородность грунта (не обязательно по горизонтальным слоям), наличие рядом с добывающими скважинами, сваями, или фундаментом сооружений, сезонных охлаждающих устройств, содержащих хладоген и работающих без внешних источников энергии только за счет законов физики. Учет этих факторов при моделировании тепловых полей в грунте приводит к решению для трехмерного квазилинейного уравнения (квазилинейность уравнения обусловлена зависимостью теплофизических параметров грунта от температуры) теплопроводности задачи Стефана в прямоугольном параллелепипеде, но уже с нелинейным краевым условием на поверхности грунта. В работе [1] описана подобная модель для трубопровода с учетом фильтрации жидкости в грунте, но без учета возможности фазового перехода.

На основе разработанной модели был написан пакет программ “Wellfrost”, особенностью которого является его адаптация к выбирамому конкретному географическому месту, где требуется нахождение тепловых полей в грунте. Проведенные расчеты были использованы российскими компаниями при проведении проектных работ на нескольких нефтегазовых месторождениях. Были выявлены некоторые интересные эффекты, связанные с аккумулированием тепла в зависимости от теплофизических параметров грунта. Эти эффекты впоследствии нашли свое подтверждение при проведении ремонтных работ на Сузунском месторождении. Планируется на основе пакета программ “Wellfrost” для предприятий нефтегазовой промышленности (в России, в зоне ММП добывается около 93% российского природного газа и 75% нефти) и строительных организаций (более 75% всех зданий и сооружений в зоне вечной мерзлоты построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований) предложить новый качественный вид “облачных услуг” — проведение удаленных вычислений (в том числе и на суперЭВМ) по получению нестационарных трехмерных тепловых полей для оценки деградации вечной мерзлоты от “теплых” инженерных объектов (например, скважин) и для оптимального размещения в случае необходимости устройств для термостабилизации грунта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-96014) и Программой межрегиональных и межведомственных фундаментальных исследований Уральского отделения РАН (проект 12-С-1-1001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Башуров Вл. В., Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю. *Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости*. Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 4. С. 3–19.

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ МЕТАНОГИДРАТОВ

A. A. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Согласно современным представлениям, газогидраты — это соединения с водой, обладающие сложной пространственной структурой. Молекулы топлива оказываются в окружении молекул воды. Например, метаногидрат относится к КС-1 пространственной структуре и на одну молекулу метана-“гостя” в этой структуре приходится $h=23/4$ молекулы воды. К сожалению, термодинамические данные о гидратах достаточно скучны. Тем не менее, углеводородные газовые гидраты привлекают пристальное внимание исследователей как перспективное топливо, как химическое сырье, как серьезный “нарушитель” экологии за счет выделения метана в атмосферу (парниковый эффект)...

В данном докладе рассчитаны параметры горения и детонации гипотетического “гидрата” в виде смеси метана–воздуха–водяного пара (все в газовой фазе). Рассмотрен также вариант разложения метаногидрата на газообразный метан и жидкую воду с образованием горючей метано–воздушной смеси. Расчеты выполнены с помощью Программы “Безопасность”.

Установлено, например, что смесь, соответствующая метаногидрату КС-1 структуры способна, в принципе, даже детонировать при соответствующих масштабах метаногидратного заряда и энергиях инициирования, и тем более гореть. Подобный вывод основан на том, что смесь с КС-1 структурой попадает внутрь концентрационных пределов, причем достаточно близко к нижнему концентрационному пределу. Структурам с большими значениями h соответствуют концентрации метана вне области концентрационных пределов.

Расчетные данные представлены в графическом виде для наиболее интересных параметров горения и детонации. Расчетные и известные экспериментальные величины хорошо согласуются друг с другом, потому расчетные данные могут использоваться в качестве оценочных при прогнозировании взрывобезопасности углеводородных газогидратов.

ВОЛНА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВОДА–ЛЕД КАК ВОЛНА “ГОРЕНИЯ”

A. A. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Известно, что при определенных условиях вода может находиться в квазиравновесном состоянии, именуемом переохлажденной жидкостью. При ударно-волновом воздействии на такую среду происходит фазовый переход из жидкой фазы в кристаллическую. Подобные процессы наблюдаются, например, в верхних слоях атмосферы

при обледенении летательных аппаратов при их полете через облака переохлажденного водяного пара.

Процесс фазового перехода вода–лед сопровождается выделением энергии и может быть рассмотрен как пример системы с положительным энерговыделением, типичным для процессов горения и детонации в реагирующих смесях. Тогда в столбе переохлажденной жидкости (аналог длинного цилиндрического заряда) возможно распространение волны конденсации вдоль заряда, вызванной, например, ударно-волновым воздействием по торцу. Такая волна конденсации является аналогом волны нормального горения, распространяющейся по заряду горючей смеси.

В одномерном приближении рассмотрена задача о распространения волны конденсации на основании законов сохранения массы, импульса и энергии для двух произвольных сечений трубы тока постоянного сечения по аналогии с описанием распространения волн горения и детонации в реагирующей смеси. В качестве уравнения состояния для воды использовано уравнение Тэтта. Аналогом энерговыделения взрыва является энергия фазового перехода вода–лед. Получены оценки для характерных скоростей распространения волны конденсации.

МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ И АРМИРОВАНИЯ ЛЬДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛЕДЯНЫХ И ЛЬДОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Н. К. Васильев, А. А. Иванов, И. Н. Шаталина

ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, Санкт-Петербург

Рассмотрены методы регулирования физико-механических свойств льда путем армирования для создания ледяных и льдогрунтовых композиционных материалов, проанализирован опыт применения методов в гидротехническом, транспортном и других строительствах. Приведен обзор и анализ методов с выявлением их достоинств и недостатков. Показано, что к настоящему времени разработаны новые эффективные методы армирования и создания ледяных и льдогрунтовых композитов, которые могут с успехом применяться для возведения противофильтрационных элементов грунтовых плотин и полноценных заменителей традиционных строительных материалов в северной строительно-климатической зоне.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА И МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПРИ УДАРНО-ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

*В. П. Глазырин¹, С. В. Зефиров², А. В. Кочетков², С. В. Крылов², М. Ю. Орлов¹,
Ю. Н. Орлов¹, Е. Ю. Повереннов²*

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

²*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского*

В настоящее время научно-исследовательские работы по изучению основных механизмов и закономерностей процессов ударного и взрывного нагружения льда и мерзлого грунта не утратили актуальности. Это связано с развитием транспортных связей в акваториях замерзающих морей, отработкой ракетно-артиллерийского вооружения в ледяных пустынях Арктики и Антарктики, увеличением добычи природных ископаемых в условиях вечной мерзлоты, поиска новых путей по решению проблемы ледников и т.д. Основная сложность исследований заключается в том, что эти древнейшие природные материалы мало изучены в условиях динамического нагружения из-за их сложной структуры, а также в силу их аномальных физических свойств, наличия многократных фазовых переходов и т.п. Известно, что с точки зрения разрушения поликристаллический лед вообще может не иметь аналогов. Целью настоящей работы является развитие физико-математической модели поведения льда и мерзлого грунта при динамических нагрузках, а также решение ряда прикладных задач в интересах развития современной механики деформирования и разрушения льда и мерзлого грунта.

Деформирование мерзлого грунта моделируется на основе нелинейных уравнений динамики упругопластической пористой четырехкомпонентной среды [1]. Связь между давлением и плотностью принимается в виде аддитивного уравнения состояния с учетом объемных концентраций компонент. Разгрузочные кривые предполагаются в виде двухзвенных ломаных. Сдвиговое деформирование описывается соотношениями Прантля — Рейсса. Макроразрушение льда и мерзлого грунта определяется и моделируется откольно-сдвиговыми механизмами.

В качестве основного инструмента исследований использовались численные методы Уилкинса, Годунова и численный лагранжев метод Джонсона, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности материала, не накладывающем серьезных ограничений на решения динамических многоконтактных задач [2].

Решены задачи взрыва, а также осесимметричного удара и проникания жестких и деформируемых ударников в лед и мерзлый грунт, в том числе с учетом разрушения среды. Ряд расчетов проведен при помощи супер-компьютера СКИФ-Cyberia. Результаты получены в виде рассчитанных конфигураций “ударник – среда”, графиков и таблиц. Результаты численных расчетов сравниваются с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-08-90711-моб-ст).

ЛИТЕРАТУРА

- Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В. Численное моделирование взрывных процессов в мерзлом грунте Изв.РАН МТТ. 2007. № 6. С. 128–136.
- Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610911 от 28.01.2010 “Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметрическая задача”.

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. П. Глазырин, М. Ю. Орлов, Ю. Н. Орлова

НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета

Интерес исследователей к задачам ударного и взрывного нагружения льда вызван прежде всего наличием его огромного количества на нашей планете. В настоящей работе поведение льда описывается основной системой уравнений механики сплошных сред, т.е. уравнениями неразрывности, движения и энергии, записанными в лагранжевых координатах. Тензор напряжений разбивается на девиаторную и шаровую составляющие. Для определения гидростатического давления используется уравнение состояния в форме Уолша. Компоненты девиатора тензора напряжений находятся по модели упругопластического течения, основанной на уравнениях Прандтля — Рейса, ассоциированных с условием текучести Мизеса. Действие взрывного нагружения на материал задается в приближении модели мгновенной детонации заряда взрывчатого вещества. Уравнение состояния продуктов детонации выбрано в виде политропы Ландау — Станюковича. Численное решение поставленной краевой задачи проводится в двумерной постановке для осевой симметрии лагранжевым методом Джонсона, обобщенным на случай больших деформаций и разрушения материала на фрагменты посредством введения в расчетную часть модели механизмов расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Механизм разрушения расчетных элементов вводится на свободных и контактных поверхностях подобно эрозионному процессу.

При помощи разработанного программного комплекса решена задача о разрушении ледовой пластины зарядом взрывчатого вещества, помещенного в воду подо льдом, а также задача о внедрении крупногабаритного ударника, наполненного взрывчатым веществом, в ледовую пластину, лежащую в одном варианте на водной, а в другом варианте на гранитной подложке. Данная задача актуальна, например, для тех случаев геологоразведочных работ или добычи полезных ископаемых, когда быстрому доступу к грунту или воде препятствует толстый слой льда. Рассматривается ударник с оживальной головной частью длиной 1 м и диаметром 0.48 м. Начальная скорость 290 м/с, ледовая пластина толщиной 2 м, толщина стального корпуса ударника в цилиндрической части составляет 15 мм. Внутри ударника взрывчатое

вещество типа ТНТ, через 9.5 мс происходит детонация ВВ. Получены деформационные картины и зоны разрушения льда, а также скорость его свободной поверхности и давление в подложке.

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ГОЛОЛЕДНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

P. B. Гольдштейн, B. P. Епифанов

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва

Исследуется адгезионная прочность ледяной корки, намороженной на поверхность элемента конструкций в зависимости от условия на границе контакта, включая соотношение сдвиговых и нормальных напряжений, а также влияние бокового стеснения, температуры, времени неподвижного контакта, скорости нагружения, геометрии поверхности и гидрофобного покрытия. Соответственно задаче исследования предложены методики и устройства для измерения адгезии льда к другим материалам, в частности, на плоских и цилиндрических образцах. Адгезионную прочность льда на образцах-пластинах определяли при отрыве и (или) сдвиге. Для цилиндрических образцов — в условиях комбинированного сдвига (вдоль оси образца и в окружном направлении), причем переход от трения покоя к трению скольжения контролировали с помощью акустических методов. Исследованы образцы с антиадгезионным полимерным покрытием и без него. Изучена структура льда вблизи поверхности контакта и вдали от нее. Показано, что при наличии покрытия вблизи него образуется ориентированная структура (кристаллиты вытянуты в направлении, трансверсальном к границе). Измерение микротвердости льда в этом ориентированном слое и вне него позволяют полагать, что структура пограничного адгезионного слоя льда влияет на механические свойства его самого и соединения, в том числе и на адгезионную прочность. Показано, что наличие даже малого сдвига в окружном направлении резко снижает адгезионное сопротивление по отношению к осевому сдвигу. Исследована адгезия льда к алюминиевым пластинкам и к реальному конструкционному элементу токонесущего кабеля с антиадгезионным покрытием и без покрытия. Сделаны выводы о практическом применении полученных результатов.

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА И НЕКОТОРЫЕ ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

P. B. Гольдштейн, Н. М. Осипенко

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва

Интерес к механике разрушения льда и ледяного покрова во многом связан с его ролью в обменных процессах в акваториях арктических морей и смежных регионов. Ледяной покров как тонкое покрытие, находящееся в механическом состоянии, близком к предельному равновесию, представляет собой уникальную конструкцию, обладающую подобно другим крупномасштабным природным объектам специфическими механизмами отклика на внешние воздействия. Процессы деформирования и разрушения в нем могут развиваться в нескольких сопряженных масштабах. В малом масштабе (масштаб порядка размера лабораторного образца или толщины ледяного покрова) процессы разрушения при разрыве контролируются величиной критического коэффициента интенсивности напряжений. При возрастании размеров появляются другие формы разрушения, которые могут моделироваться в рамках аналогичной концепции [1]–[2].

Рассмотрен процесс разрушения льда при большой площади контакта. Основные положения модели основываются на гипотезе о существовании квазирегулярной структуры разрушения области контакта, в которой локальный очаг разрушения имеет возможность перемещаться по поверхности контакта (сканировать ее) в режиме, подобном движению трещины (трещина сжатия). Характер режима движения определяется условиями перемещения и выноса продуктов разрушения как эффективной вязкопластической среды из зоны контакта. Даны критерии подобия для внутренней и внешней задач, относящиеся к локальным и глобальным масштабам соответственно, а также указана процедура сшивания решений внешней и внутренней задач, полученных либо путем физического, либо математического моделирования.

Предложена модель инициирования тороса в результате формирования и развития трещиноподобного объекта с перехлестывающимися вследствие локального изгиба берегами. Введена характеристика сопротивляемости ледяного покрова тороплению — “торосстойкость” — величина критического коэффициента интенсивности сжатия. Приведена классификация крупномасштабных структур разрушения ледяного покрова.

Представлен анализ условий разрушения ледяного покрова ледоколами с разбиением задачи на внешнюю, относящуюся к деформированию ледяного покрова в региональном масштабе, и внутреннюю, описывающую локальные аспекты разрушения. С этих позиций выделен ряд форм разрушения ледяного покрова. Связь внешней и внутренней задач о разрушении ледяного покрова обеспечивается одним параметром — коэффициентом интенсивности напряжений сжатия в окрестностях вершины канала-щели во внешней задаче. Показано, что предложенный подход может быть полезен при выборе оптимальных траекторий движения ледокола, в том числе для контроля поля напряжений в ледяном покрове.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ФИ Президиума РАН №23.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н. М. *Механика разрушения и некоторые вопросы разрушения льда*. В кн.: Механика и физика льда. М.: Наука, 1983. С. 31–62.
2. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н. М. *Трещиностойкость ледяного покрова и его разрушение ледоколами*. Труды. ААНИИ. 1985. Т. 391. С. 137–157.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКАНИЯ УДАРНИКОВ В ПРЕСНЫЙ ЛЕД ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $0 \div -25^{\circ}\text{C}$

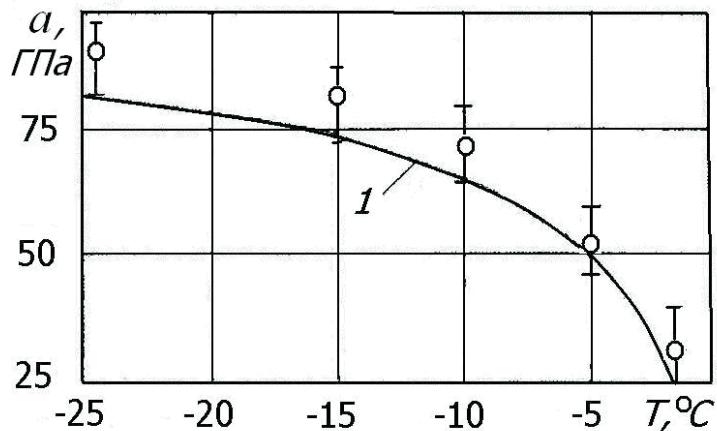
В. А. Горельский, А. А. Коняев, В. Ф. Толкачев

*НИИ прикладной математики и механики
Томского государственного университета*

В работе приведены результаты экспериментального и физического моделирования параметров волн напряжений, сдвигового и отрывного разрушения в пресном льду при высокоскоростном нагружении. Получены обобщенные зависимости, связывающие безразмерные параметры с краевыми условиями задачи и физико-механическими свойствами взаимодействующих материалов.

Пресный лед вырезался блоками размером $400 \times 400 \times 1000$ из речного льда или замораживался послойной заливкой при температуре -25°C . Основным требованием при выборе толщины блоков изо льда было отсутствие влияния тыльной поверхности на измеряемую глубину проникания. В качестве ударников использованы компактные и удлиненные до 12 калибров стержни из стали 60С2А, титана ВТ-6, алюминиевого сплава Д16М. Интервал скоростей соударения составил $80 \div 800$ м/с.

Кратерообразование во льду сопровождается значительным по объёму отколом лицевой поверхности. Объём конусообразной зоны отколотого материала сопоставим с объёмом кратера или превышает его. Для хрупких препяд, для которых форма кратера вуалируется лицевым откольным разрушением, потребовалось определение динамической прочностной характеристики для согласования расчетной и измеренной глубины проникания. Были проведены эксперименты для определения работы вытеснения единицы объёма при глубоком проникании в него недеформируемого стержня. При скоростях соударения $V_0 < 0.1$ км/с площадь поперечного сечения ударника совпадает с площадью поперечного сечения цилиндрического кратера. Для такой схемы проникания глубина кратера равна $L_k/l_c = r_c V_0^2 / 2a$. Подставляя экспериментальные значения L_k/l_0 , r_c , V_0 , получаем величину a работы вытеснения единицы объёма. На рисунке приведены результаты оценки работы вытеснения единицы объёма для пресного речного льда. Из приведенных данных следует, что с ростом минусовой температуры льда работа вытеснения единицы объема уменьшается. Это приводит к увеличению относительной глубины проникания недеформируемого стержня в лед.



Экспериментальные данные работы вытеснения единицы объёма для пресного речного льда при начальной температуре от 0 до -25°C . Кривая 1 — зависимость динамической твердости льда от температуры [1].

ЛИТЕРАТУРА

- Богородский В. В., Гаврило В. П. *Лёд. Физические свойства. Современные методы гляциологии.* - Л., 1980.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ ГАЗОГИДРАТОМ ИЛИ ЛЬДОМ

A. A. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева, Д. Н. Дудко

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН*

Предложена математическая модель движения пористой среды, содержащей гидрат или лед, в рамках которой гидрат (лед) рассматривается как отдельная фаза, со своей скоростью и напряжением. Скелет пористой среды считается двухфазным, состоящим из контактирующих между собой зерен двух материалов с различными свойствами, т.е. в скелете различаются зерна грунта и зерна газогидрата (льда). В такой пористой среде выделяются 3 фазы: скелет, гидрат (лед) и флюид. Вводится эффективное напряжение в скелете такой трехфазной пористой среды. Получено уравнение состояния упругого двухфазного скелета, представляющее собой зависимость между эффективным напряжением, деформациями скелета и гидрата (льда) и давлением во флюиде. Численно исследован процесс распространения волн в пористой среде, содержащей гидрат (лед). Также численно изучено прохождение и отражение волн на границах между обычной и содержащей гидрат (лед) пористой

средой. Данная система уравнений позволяет исследовать волновые процессы в гидратосодержащих пористых средах в отсутствие фазовых переходов, что представляет интерес с точки зрения развития технологий поиска пластов, содержащих газовые гидраты, а также зон залегания вечной мерзлоты.

ДВИЖЕНИЯ СУДНА В КРУПНОБИТЫХ ЛЬДАХ И ОБЛОМКАХ ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ

A. A. Добродеев, K. E. Сазонов

ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, Санкт-Петербург

Необходимость изучения особенностей движения судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей возникла в последнее время в связи с планами широкого использования при плавании в Арктике крупнотоннажных судов, ширина которых существенно превышает ширину существующих ныне ледоколов. Для эффективной проводки таких судов во льдах применяются и разрабатываются новые тактические схемы, включающие проводку одного судна двумя ледоколами или движение крупнотоннажного судна параллельно каналу, проложенному ледоколом. И в том, и в другом случаях судно должно двигаться в крупнобитых льдах или обломках ледяных полей. Ранее для расчета ледового сопротивления судна в этих условиях использовалась эмпирическая формула. В докладе предложен метод расчета ледового сопротивления, базирующийся на решении дифференциального уравнения движения обломков льдин в процессе их взаимодействия с корпусом судна. Разработанная методика может применяться и при расчете сил, действующих на корпус судна, движущегося параллельно каналу, проложенному ледоколом.

МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

B. П. Епифанов, Н. Г. Соловьев

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Исследуется взаимодействие когерентного электромагнитного излучения со льдом. Научная сторона вопроса связана с изучением механизмов разрушения льда и, в частности, моделированием процесса абляции ледников. Практические приложения результатов исследований состоят в разработке экологически чистого способа бурения, лазерном бурении шурфов для размещения датчиков контроля состояния и перемещения льда в ледниках и отбора проб из глубинных слоев ледников. В настоящее время разработан экспериментальный образец лазерного бура на основе компактного CO₂-лазера мощностью 100 Вт, и стационарное устройство для проведения экспериментальных исследований на базе лазера мощностью 2 кВт. Получены

предварительные результаты по скорости проникновения лазерного луча в лед, составляющие 2 мм/с. Для получения информации о кинетике развития разрушения во время эксперимента синхронно регистрировали сигналы акустической эмиссии в диапазоне частот от 100 Гц до 20 кГц. Предварительные выводы о кинетике протекания актов разрушения льда были подтверждены фото-видео регистрацией процесса. Кроме того, исследовали морфологию поверхности разрушения льда. Анализ полученных результатов и расчетов показал перспективность этого направления исследований и возможность применения полученных данных в практических приложениях полярной механики.

ОБ ОДНОМ МЕХАНИЗМЕ ЗАСЕВА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ МИКРОПУЗЫРЬКАМИ

Е.В. Ерманюк¹, Н.В. Гаврилов¹, П. Хикс², Р. Пурвис²

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

² Университет Восточной Англии, Норидж, Великобритания

Несмотря на практическую значимость проблемы обледенения крыльев самолетов, многие физические аспекты этого процесса изучены недостаточно. Это в особенности относится к наиболее опасным случаям обледенения, происходящим при полете самолета в воздушных областях, засеянных так называемыми суперкаплями переохлажденной жидкости, имеющими размер до нескольких миллиметров. В таких экстремальных условиях интенсивность обледенения настолько высока, что в течение двух минут подъемная сила может упасть, а сопротивление воздуха на величину порядка 30%. Интенсификация кристаллизации происходит, в частности, за счет засева микропузырьками тонкого слоя переохлажденной жидкости на передней кромке крыла самолета [1]. Эксперименты с высокоскоростным падением капель представляют значительные трудности [2]. Полученные в таких экспериментах данные зачастую имеют значительные разброс, что затрудняет точную оценку размеров воздушной области, возникающей в зоне начального контакта капли и поверхности воды [3]. В настоящей работе экспериментально и теоретически рассмотрена модельная задача о падении твердой сферы на свободную поверхность жидкости. Радиус сферы варьировался от 30 до 80 см, скорость соударения изменялась в диапазоне от 0.02 до 1.2 м/с. Эксперименты проводились в лотке размерами 100x100x30 см. При теоретическом моделировании жидкость считалась эффективно невязкой и имеющей деформируемую свободную поверхность, а движение воздуха в тонкой воздушной прослойке между носиком тела и свободной поверхностью описывалось с помощью уравнений теории смазки. Было получено хорошее совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными. Проведено также сопоставление с имеющимися экспериментальными данными по падению капель на поверхность воды [2]. Показано, что теория [1] имеет широкий диапазон применимости. Она адекватно описывает как результаты настоящих модельных опытов, так и результаты [2]. Более подробно результаты настоящего исследования изложены в [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Hicks P., Purvis R. Air cushioning and bubble entrapment in three-dimensional droplet impacts // J. Fluid Mech. 2010. V. 649. P. 135-163.
2. Thorroldsen S.T., Etoh T.G., Takehara K. Air entrapment under an impacting drop // J. Fluid Mech. 2003. V. 478. P. 125-134.
3. Mani M., Mandre S., Brenner M.P. Events before droplet splashing on a solid surface // J. Fluid Mech. 2010. V. 647. P. 163-185.
4. Hicks P., Ermanyuk E.V., Gavrilov N.V., Purvis R. Air trapping at impact of a rigid sphere onto a liquid // J. Fluid Mech. 2012. V. 695. P. 310-320.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОД ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ

В. Л. Земляк¹, В. М. Козин²

¹Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема,
Биробиджан

²Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре

В работе приводится анализ модельных экспериментов по исследованию волнового сопротивления подводного судна при движении под ледяным покровом. Известно, что максимальные значения волнового сопротивления, действующего на погруженное тело в результате генерации поверхностных волн, соответствуют волноводному режиму распространения изгибо-гравитационных волн в ледяном покрове от движения подводного судна [1]. С целью исследования волнового сопротивления была проведена серия экспериментов в опытном бассейне [2], посредством буксировки модели подводного судна под модельным льдом с использованием гравитационной буксировочной системы. В качестве модельного льда использовалась упругая пленка. Волновое сопротивление определялось как разность полных сопротивлений при малом и большом заглублении модели. Эксперименты показали, что пику волнового сопротивления соответствовала не резонансная скорость движения нагрузки, а скорость волноводного режима волнообразования, при этом величина волнового сопротивления при движении под ледяным покровом была выше, чем при движении модели под поверхностью свободной воды. Приведены графики зависимости волнового сопротивления от различных ледовых условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00130).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин В. М. *Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движение объектов*. Владивосток: Дальнаука, 2005.
2. Земляк В. Л. *Лаборатория механики сплошных сред*. Вестник “КнАГТУ”. 2009. С. 244–246.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И СПОСОБОВ ИХ ЛИКВИДАЦИИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

И. К. Иванова, Е. Ю. Шиц

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, Якутск

На территории Якутии нефтяные месторождения, находящиеся в опытно-промышленной эксплуатации, расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Добываемые нефти характеризуются преимущественно метановым составом (41–73%) и повышенным содержанием асфальтенов (до 11%) и смол (до 43%). Перечисленные факторы приводят к коагуляции и кристаллизации асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) непосредственно в пласте, в его призабойной зоне (ПЗП) и на поверхности насосно-компрессорных труб (НКТ). Основным способом борьбы с АСПО на Иреляхском ГНМ является периодическая обработка НКТ добываемым на этом же месторождении газовым конденсатом, ежегодный расход которого составляет порядка 300 м³, однако полностью очистить оборудование от отложений не удается. Таким образом, целью настоящего исследования является изучение растворимости АСПО в газовом конденсате при низких температурах, а также определение оптимального направления для повышения эффективности его применения. В экспериментах использовали АСПО Иреляхского ГНМ, образующиеся на поверхностях НКТ. Поскольку пластовая температура залежи не превышает 10–150°C, эксперименты были проведены при 10°C. Групповой состав АСПО определен адсорбционным методом по Маркуссону, установлено, что исследуемое АСПО относится к парафиновому типу (тип П3). Углеводородный состав газового конденсата был изучен методом газожидкостной хроматографии. Установлено, что в его составе распределение н-алканов носит бимодальный характер с максимумами на гексане и додекане. В качестве растворителей АСПО были изучены газовый конденсат, гексан (как модель легкой фракции конденсата) и композиционная смесь, состоящая из гексана и бензола (ГБС) в соотношении 1:1. Оценку эффективности растворителей производили по методике "Нефтепромхим" где эффективность реагента оценивалась по изменению массы отложений при их контакте с растворителями, температура проведения эксперимента 10°C, время контакта — 4 часа, статические условия. Результаты исследования моющей способности растворителей как универсального показателя эффективности приведены в таблице.

Моющая способность, % мас.	Реагент		
	Конденсат	Гексан	Гексан+Бензол (1:1)
38	97	100	

Установлено, что применение газового конденсата при низких температурах является не лучшим выбором для удаления отложений с поверхности нефтепромыслового оборудования. Наиболее эффективно разрушают структуру парафинистого АСПО гексан и ГБС, т.к. в состав этих реагентов входят низкокипящие алифатические УВ, которые являются неплохими растворителями парафиновых УВ. Таким образом, технический и, соответственно, экономический эффект при применении газового конденсата, в качестве растворителя АСПО, может быть достигнут: 1) путем фракционирования конденсата на пункте подготовки нефти с получением гексановой фракции, что значительно уменьшит затраты на транспортировку растворителя; 2) подбором и разработкой композиционного состава на основе конденсата или прямогонных нефтяных фракций с добавлением ароматических присадок.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ПАРАФИНА В БИНАРНОЙ СИСТЕМЕ ГЕКСАН – БЕНЗОЛ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 10 ДО 60°С

И. К. Иванова, Е. Ю. Шиц

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, Якутск

Оптимальный растворитель асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) должен иметь в своем составе как алифатические, так и ароматические компоненты, чтобы обеспечить разнообразие хемосорбционного взаимодействия, которое возникает на границе раздела их фаз. Поэтому с целью моделирования сезонных условий эксплуатации скважин были проведены кинетические исследования процесса растворения АСПО парафинистого типа в композиционной смеси, состоящей из гексана и бензола в соотношении 1:1 (ГБС) в интервале температур от 10 до 60°С в сравнении с применяемым непосредственно на Иреляхском месторождении для удаления отложений газовом конденсате при 10 и 25°С. Полученные логарифмические анаморфозы кинетических кривых растворения АСПО в ГБС и газовом конденсате имеют линейный характер, что позволяет для их описания использовать топохимическую модель. Высокие значения достоверности аппроксимации (r^2 , таблица) всех анаморфоз подтвердили адекватность используемой модели.

Модель системы		n	r^2	K , мин $^{-1}$	$\tau_{1/2}$, мин	Еа, кДж/моль
Образец	t , °C					
АСПО + газовый конденсат	10	0,50±0,04	0,943	8,45·10 $^{-5}$	—	292,60
	25	1,25±0,08	0,996	4,42·10 $^{-2}$	15,68	
АСПО + ГБС 1:1	10	1,00±0,07	0,981	3,10·10 $^{-2}$	22,36	31,64
	25	1,05±0,13	0,975	6,10·10 $^{-2}$	11,36	
	40	1,04±0,11	0,982	1,53·10 $^{-1}$	4,53	
	60	1,13±0,16	0,993	3,47·10 $^{-1}$	2,00	

Установлено (табл.), что процесс разрушения АСПО в газовом конденсате при 10°С является диффузионно контролируемым (значение порядка реакции $n = 0,5$), при нагреве конденсата до 25°С процесс переходит из диффузионного режима в кинетический ($n = 1,25$). Показано, что в бинарной системе процесс растворения АСПО при разных температурах протекает как реакция первого порядка ($n = 1$), т.е. скорость растворения АСПО в ГБС не ограничивается ни скоростью физико-химического взаимодействия на поверхности раздела фаз, ни диффузией. Константы скоростей растворения (K) и периоды полупревращения ($\tau_{1/2}$) АСПО в бинарной смеси при 10°С и в конденсате при 25°С практически совпадают, что говорит об одинаковой растворяющей способности холодного композита и нагретого конденсата. Проведенные исследования позволили выявить линейную зависимость констант скорости растворения от обратной температуры, т.е. процесс растворения АСПО в ГБС подчиняется уравнению Аррениуса, что дало возможность рассчитать эффективную энергию активации растворения отложений. Видно, что энергия активации разрушения АСПО в ГБС почти в 10 раз меньше по сравнению с конденсатом, что свидетельствует о высокой активности алифатико-ароматических растворителей. Таким образом, впервые на основе представлений о природе физико-химического взаимодействия, происходящего на границе раздела фаз АСПО–растворитель, последовательности и скоростях стадий, определены кинетические параметры растворения органических отложений парафинистого типа в различных реагентах при разных температурах и установлены лимитирующие стадии этих процессов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗАЯКОРЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

Н. Ю. Клементьева, К. Е. Сazonov

ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова”, Санкт-Петербург

Морские инженерные сооружения с якорной системой удержания являются одним из перспективных типов платформ, предназначенных для эксплуатации на относительно глубоководных участках шельфа. В последнее время такие платформы все чаще предлагается использовать в ледовых условиях. По сравнению с ледостойкими

сооружениями гравитационного типа такие платформы имеют ограниченную свободу перемещений во всех направлениях. При проектировании любых ледостойких сооружений одним из важнейших является вопрос о назначении расчетного уровня ледовой нагрузки. Для сооружений с якорной системой удержания этот вопрос усложняется необходимостью учета влияния динамики самого сооружения на уровень воспринимаемой им ледовой нагрузки.

В докладе приведены результаты модельных исследований, выполненных в ледовом бассейне ФГУП “ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова” с различными моделями сооружений. Излагается методика, разработанная в ледовом бассейне, позволяющая непосредственно измерять некоторые инерционные характеристики моделей.

ВЛИЯНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПАРАМЕТРЫ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ

В. М. Козин¹, В. Ю. Верещагин²

¹*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре*

²*Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре*

Разрушение ледяного покрова может осуществляться различными способами и техническими средствами. Одним из перспективных в этом направлении при решении определенных ледотехнических задач является резонансный метод разрушения ледяного покрова, заключающийся в возбуждении во льду резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ), возбуждаемых движущимися нагрузками, в частности амфибийными судами на воздушной подушке (СВП) [1]. При проведении ледокольных работ резонансным методом чистый от снега ледяной покров встречается редко, поэтому его реализация в условиях заснеженного ледяного покрова будет основным режимом при его разрушении резонансным методом. Данная работа посвящена исследованиям влиянию снежного покрова на параметры ИГВ, возбуждаемых в ледяном покрове движущимися нагрузками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин В. М. *Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты*. М.: Академия естествознания, 2007.

О ДИАГНОСТИРОВАНИИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОР ТРУБОПРОВОДОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

Ю. И. Колесников¹, К. В. Федин¹, А. А. Каргаполов²

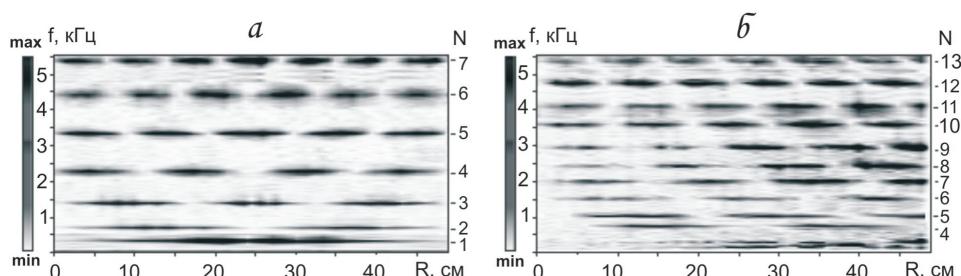
¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

При эксплуатации надземных трубопроводов в арктических районах возрастаёт вероятность потери устойчивости их опор вследствие выпучивания или просадок грунта при сезонных изменениях геокриологических условий. Это ведет к увеличению длины пролетов и, как следствие, к понижению собственных частот, что повышает вероятность возникновения ветровых резонансов, которые могут приводить к повреждению и даже разрушению участка трубопровода. В работе на данных физического моделирования иллюстрируется возможность диагностирования потери устойчивости опор трубопровода по стоячим волнам, выделенным из зарегистрированного на поверхности трубы акустического шумового поля.

Участок надземного трубопровода моделировался заполненной водой медной трубой, которая через равные промежутки была жестко зафиксирована пятью хомутами. Для имитации частичной потери устойчивости под средний хомут подкладывалась тонкая резиновая прокладка. Искусственно создаваемый в трубе акустический шум записывался цифровым осциллографом с помощью двух датчиков: один (опорный) был жестко закреплен на трубе, а другой последовательно передвигался вдоль нее между средним и одним из соседних хомутов. После каждой установки передвижного датчика производилась синхронная цифровая запись шумовых сигналов от обоих датчиков.

Обработка данных проводилась на базе программного обеспечения, разработанного в Геофизической службе СО РАН как часть ориентированной на использование малоканальной аппаратуры методики обследования зданий и сооружений стоячими волнами, выделяемыми из поля микросейсм. Методика позволяет приводить данные, записанные передвижным датчиком в разные периоды времени (при разных характеристиках шумового поля), к “единому” времени, используя синхронные записи в опорной точке. Таким образом имитируется синхронная многоканальная запись для всего профиля наблюдений, спектральная обработка которой позволяет определить как собственные частоты, так и формы колебаний обследуемого объекта.



На рисунке показаны формы колебаний участка трубы между соседними хомутами в случае их жесткой фиксации (а) и при ослабленном креплении правого хомута (б). Ось абсцисс — расстояние R (крайние точки соответствуют местам крепления хомутов), ось ординат — частота f , N — номер моды изгибной стоячей волны. Отчетливо видно, что при жесткой фиксации обоих хомутов (а) их положению соответствуют узловые точки стоячих волн для всех мод. При ослаблении крепления правого хомута (б) наряду с изменением собственных частот, вызванным увеличением длины пролета, в месте ослабленного крепления для части мод наблюдаются пучности, что, таким образом, является диагностическим признаком потери устойчивости опоры.

НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА ПОД ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

A. A. Коробкин, B. K. Костиков, Н. И. Макаренко

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Рассматривается двумерная задача о генерации нелинейных волн при нестационарном движении эллиптического цилиндра под ледовым покровом. Жидкость предполагается идеальной и бесконечно глубокой, а ледовый покров моделируется тонкой упругой пластиной, неограниченной в горизонтальном направлении и свободно плавающей на поверхности жидкости. Для решения этой задачи используется метод сведения исходной постановки к интегро-дифференциальной системе уравнений для функции, задающей вертикальное отклонение ледового покрова от положения равновесия, а также нормальной и тангенциальной составляющей скорости частиц жидкости на поверхности ее контакта со льдом. Для случая движения цилиндра с постоянным ускорением из состояния покоя построена начальная по времени асимптотика решения. На основе полученного асимптотического решения проведено сравнение волновых режимов в широком диапазоне параметров (в том числе для движения тела под свободной поверхностью и для постановки задачи в приближении битого льда).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-01-00671), ФЦП "Механика и термодинамика ледового покрова" (грант 14.740.11.0878) и интеграционного гранта СО РАН N 117.

ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ТРЕХМЕРНОМ КАНАЛЕ, ПОКРЫТОМ ЛЬДОМ

A. A. Коробкин¹, K. A. Шишимарев²

¹Университет Восточной Англии, Норвич

²Алтайский государственный университет

Трехмерная задача волнового движения воды в канале, покрытом льдом, рассматривается в следующей постановке: несжимаемая и невязкая жидкость, покрытая ледовым покровом, течет в канале конечных ширины и высоты и неограниченной длины; толщина покрова мала относительно высоты канала и длины волны; ледовый покров крепится к боковым стенкам канала; колебания ледового покрова описываются уравнением Эйлера — Бернулли.

В работе излагаются результаты об аналитических и численных решениях сформулированной задачи. Задачи с одной вертикальной стенкой исследовались в [1, 2] для плоского и трехмерного случаев соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт №14.740.11.0878).

ЛИТЕРАТУРА

1. Brocklehurst P., Korobkin A. A., Parau E. I. *Interaction of hydroelastic waves with a vertical wall*. J. Engineering Mathematics. 2010. pp. 215–231.
2. Brocklehurst P., Korobkin A. A., Parau E. I. *Hydroelastic wave diffraction by a vertical cylinder*. Philos Transact A Math Phys Eng Sci. 2010. pp. 32–51.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Г.П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения СО РАН имени акад.П.И.Мельникова

Мерзлые грунты представляют собой многокомпонентные и многофазные образования, состоящие из минеральных частиц, поры между которыми заполнены газами и водой в различных видах и состояниях. Вода в порах и капиллярах грунта замерзает в диапазоне отрицательных температур. Количество незамерзшей воды в мерзлой породе зависит от ее состава и строения, термодинамических условий и воздействия различных полей.

Содержание незамерзшей воды и льда в мерзлых грунтах в практически важном диапазоне отрицательных температур определяет их основные физические и механические свойства. Поэтому важно знать соотношение компонентов мерзлого грунта.

Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов, отражающих их состав и состояние, выражается зависимостью [1].

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w_w}{\rho_w} + \frac{w - w_w}{\rho_i} \right), \quad (1)$$

где V и V_a — объем грунта и газов, ρ_d , ρ_s , ρ_w и ρ_i — плотности сухого грунта, минеральных частиц, незамерзшей воды и льда; w и w_w — суммарная влажность и влажность по незамерзшей воде.

В работе выполнен анализ зависимости (1) при критических значениях w и w_w , характеризующих различный качественный состав воды и ее состояние в грунте. При $w = 0$ относительное содержание газов равно пористости грунта η , т.е. поры заполнены только газами. При $V_a/V = 0$ поры полностью заполнены водой и влажность грунта соответствует полной влагоемкости w_n . Причем полная влагоемкость мерзлых, промерзающих, протаивающих и талых грунтов различная и возрастает от мерзлых грунтов к талым.

Для определения относительного содержания газов V_a/V требуются следующие экспериментальные и справочные данные:

- в области интенсивных фазовых переходов воды ($0 < w_w < w$) — $w, w_w, \rho_d, \rho_s, \rho_w$ и ρ_i ;
- в области практически замерзшего состояния грунта ($w_w = 0$) — w, ρ_d, ρ_s и ρ_i ;
- в талых грунтах ($w_w = w$) — w, ρ_d, ρ_s и ρ_w .

Таким образом, рассмотренная зависимость между показателями физических свойств мерзлых грунтов характеризует взаимосвязь между ними в диапазоне фазовых переходов поровой воды, реально происходящих в массивах мерзлых грунтов при использовании их в качестве оснований и среды для сооружений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

B. N. Лабутин¹, B C. Марков²

¹Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск

²Якутский государственный университет

Комплексное освоение северных территорий России, богатых сырьевыми минеральными ресурсами, связано прежде всего с развитием горнодобывающей промышленности. Подземная разработка большинства россыпных месторождений полезных ископаемых в условиях Заполярья ведется камерно-лавной системой с применением

буровзрывного способа разрушения, характеризующейся низкими технико-экономическими показателями и уровнем безопасности [1]. Применение же прогрессивной поточной технологии на шахтах Крайнего Севера сдерживается отсутствием очистных и проходческих машин, способных разрабатывать продуктивные мерзлые пласты. Для решения этой задачи Институтом горного дела СО РАН совместно с Институтом горного дела Севера СО РАН выполнены работы по изысканию эффективного способа разрушения многолетнемерзлых горных пород — проведены экспериментальные исследования ударного способа разрушения и дана оценка возможности его использования при создании исполнительных органов проходческих и очистных машин, предназначенных для разработки россыпных месторождений в криолитозоне.

Проведенные эксперименты на шахтах Заполярья показали высокую эффективность применения ударного способа для разрушения многолетнемерзлых горных пород с интенсивностью для одного ударного инструмента ($15\text{--}25 \text{ м}^3/\text{ч}$) и сравнительно низкой удельной энергоемкостью $1.0\text{--}1.5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ [2].

Анализ горно-геологических условий россыпных месторождений Заполярья показал [3], что среди забоев подготовительных выработок наибольший удельный вес (до 98%) составляют забои, состоящие из двух типов пород: породы со значительным (более 15%) содержанием крупнообломочных включений и валунов и коренные породы, состоящие преимущественно из глинистых сланцев. Учитывая такую неоднородность строения горного массива по сечению выработки, определяющую неравнозначную сопротивляемость механическому разрушению отдельных его участков, для создания исполнительных органов проходческих и очистных машин в этих условиях была предложена комбинированная схема разрушения забоя, основанная на использовании известных преимуществ принципа резания и ударного разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шерстов В. А. *Подземная разработка многолетнемёрзлых россыпных месторождений*. Якутск: Якутский госуниверситет, ИГДС СО РАН, 2002.
2. Федулов А. И., Лабутин В. Н., Костыркин В. Н. и др. *Ударное разрушение многолетнемерзлых горных пород*. В кн.: Научные основы механизации открытых и подземных горных работ. Новосибирск: изд. ИГД СО АН СССР, 1983. С. 125–131.
3. Марков В. С. Обоснование технологии проведения подготовительных выработок россыпей Севера комбайнами с комбинированными исполнительными органами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Якутск. 1989. 18 с.

О СЕЙСМИЧНОСТИ И МЕХАНИКЕ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ

B. B. Левин^{1,2}, A. B. Доманский¹, E. B. Сасорова²

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Необычный характер распределения землетрясений и выделяемой сейсмической энергии по широтным поясам Земли явился стимулом для более детального анализа (повторного пересмотра) положений теории фигуры Земли. Согласно результатам обработки данных мировых сейсмических каталогов (NEIC USGS, ISC UK) с помощью специализированного пакета программ, разработанного авторами, два пика высокой активности отмечаются в средних широтах, локальный стабильный минимум плотности количества событий регистрируется вблизи экватора, а в полярных областях землетрясения почти отсутствуют [1, 2]. Из 250 000 проанализированных авторами событий с магнитудой $M > 4.0$ за период с 1964 по 2008 гг. на обе полярные области (70–90 град) приходится 0.005% событий (а на области 60–90 град – 0.33%).

Величина угловой скорости вращения Земли характеризуется нестабильностью. Вариации угловой скорости приводят к изменениям формы фигуры (эллипсоида вращения), вариациям момента инерции и кинетической энергии вращения планеты. Вариации радиус-вектора геоида характеризуются существенной особенностью — эта величина изменяет знак в плоскости “критической широты” ($\varphi_1 = +35^{\circ}15'52''$), где длина радиус-вектора геоида совпадает со средним радиусом Земли, не зависит от величины сжатия и, соответственно, от угловой скорости вращения Земли. Обнаружено, что величина приращения объемной плотности энергии, обусловленная вращением эллипсоида, демонстрирует два максимума в районе критических широт, стабильный минимум в зоне экватора и минимальные значения в полярных областях. Установленный эффект зональной концентрации энергии во вращающемся небесном теле является результатом выбора вариации плотности энергии в качестве параметра, который зависит от широты и, в частности, от модуля зональной сферической функции второго порядка. Оценка величины дополнительной энергии, выделяемой ежегодно в теле Земли из-за нестабильности вращения, превышает 10^{18} Дж. Эта величина по порядку совпадает с энергией, сбрасываемой в землетрясениях. Отсутствие сейсмичности в полярных областях находит полное объяснение в рамках предложенной гипотезы, поскольку причиной возникновения землетрясений можно считать аккумуляцию механической энергии в средних широтах и экваториальной зоне в результате изменения формы Земли из-за нестабильности угловой скорости ее вращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б.В., Сасорова Е.В. *Бимодальный характер широтных распределений землетрясений в Тихоокеанском регионе как проявление глобальной сейсмичности.* ДАН. 2009. Т. 424. № 4. С. 538–542.
2. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Доманский А.В. *О гидродинамической неустойчивости в средних широтах Земли, обусловленной вращением планеты.* ДАН. 2011. Т. 438. № 1. С. 110–113.

ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

M. A. Леган

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Вероятность хрупкого разрушения элементов конструкций возрастает в условиях низких температур. В окрестности концентраторов напряжений имеет место сложное напряженное состояние, которое обычно также способствует хрупкому характеру разрушения. Такой вид разрушения наиболее опасен, поэтому экспериментальные исследования проведены на модельных хрупких и квазихрупких материалах. Для анализа полученных экспериментальных данных использовались решения линейной теории упругости и нелокальные критерии разрушения.

Представлены результаты экспериментов по разрушению образцов в виде пластин и дисков с центральными отверстиями. Пластины растягивались в одном направлении, а диски сжимались по диаметру. Образцы были изготовлены из пенополистирола, гипса и двух видов эбонита. Для этих материалов определены значения критического коэффициента интенсивности напряжений и предела прочности. Для гипса получен только условный предел прочности при растяжении (брязильским методом).

При использовании классических локальных критерии прочности обычно предполагается, что разрушение начинается при достижении максимальным эквивалентным напряжением предельного значения хотя бы в одной точке тела. Однако в условиях концентрации напряжений и резкой неравномерности их распределения локальные критерии дают заниженные оценки предельных нагрузок по сравнению с экспериментальными данными. В этом случае целесообразно применять нелокальные условия прочности, например, интегральный и градиентный критерии. Проведено сравнение локального, интегрального и градиентного критериев разрушения как между собой, так и с экспериментальными данными по разрушению образцов с отверстиями. Показано, что интегральный и градиентный критерии дают более высокие оценки предельных нагрузок и лучше описывают опытные данные по сравнению с локальным критерием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00522).

ПОВЫШЕНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ МЕТОДОМ РКУП

Е. С. Лукин, Н. Д. Петрова, А. М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН

Изделия, прошедшие механическую обработку по способу равноканального углового прессования (РКУП), обладают уникальной структурой и высокими прочностными характеристиками. Высокая степень упрочнения в металлах достигается за счет измельчения зернистой структуры до размеров менее 1 микрона. Применение интенсивной пластической деформации (ИПД) для упрочнения малоуглеродистых сталей по способу РКУП позволяет повысить предел текучести в 2–3 раза. Однако такой подход не всегда обеспечивает получение оптимального сочетания эксплуатационных характеристик обрабатываемой стали. Упрочнение малоуглеродистой стали по способу РКУП приводит к охрупчиванию материала. Повышение порога хладноломкости стали, упрочненной методом ИПД, особенно негативно сказывается в условиях низких климатических температур. Поэтому повышение хладостойкости конструкционных сталей, упрочненных методом РКУП, является актуальной научно-практической задачей. Целью исследования является получение заготовок из малоуглеродистой стали, упрочненных ИПД и обладающих оптимальным сочетанием характеристик прочности и сопротивления хрупкому разрушению, особенно в условиях низких климатических температур. Объектом исследования является малоуглеродистая сталь марок Ст3сп и 09Г2С.

Упрочнение стали проведено методом ИПД по способу РКУП. В результате механического упрочнения стали по способу РКУП предел текучести и предел прочности Ст3сп повысился до 820 МПа и 835 МПа, а для стали 09Г2С с предварительной закалкой в воде — до 1160 МПа и 1230 МПа соответственно. В сравнении с исходным состоянием предел текучести увеличился в 2,4 ÷ 3,5 раза, а предел прочности в 1,6 ÷ 2,6 раза. Упрочнение малоуглеродистой стали по способу РКУП привело к охрупчиванию материала. Для повышения сопротивления хрупкому разрушению опробованы различные виды термообработки стали. Установлено, что наилучшие показатели ударной вязкости достигаются при комбинированной термомеханической обработке. Применение комбинированной термомеханической обработки малоуглеродистой стали по схеме "закалка + РКУП + отжиг" позволяет существенно улучшить показатели ударной вязкости.

Таким образом, применение комбинированной термомеханической обработки малоуглеродистой стали по схеме "закалка + РКУП + отжиг" позволяет существенно улучшить показатели ударной вязкости с незначительным снижением характеристик прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-01-98509).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ ПОЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЕТОЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А. Д. Матвеев

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Рассматривается стационарная трехмерная задача теории упругости о напряженно-деформируемом состоянии толстого ледяного поля под действием сил тяжести и внешних нагрузок при понижении уровня воды в реке. Предполагается поведение льда упругим вплоть до хрупкого разрушения, жесткое смерзание льда с берегами реки, береговыми сооружениями, опорами мостов и др., и что ледяное поле “зависает” над поверхностью воды реки. В этом случае вблизи берега, опор мостов и береговых сооружений возникает область сильно напряженного льда. Оценка этой “опасной зоны” важна при проектировании опор мостов, береговых сооружений, прокладки зимников и т. д. В [1] рассматривается стационарная задача о равновесии ледяного слоя вблизи плоского участка берега при перепаде уровней воды, использовались уравнения плоской задачи теории упругости. В данной работе для исследования деформирования ледяного поля применяется метод конечных элементов. При этом используются трехмерные многосеточные конечные элементы (МнКЭ) [2]. Достоинства MnKЭ состоят в том, что они порождают дискретные модели малой размерности и способны учитывать неоднородность льда, связанную с жесткими включениями (например, металлические решетки, деревянные шпалы и др.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00053).

ЛИТЕРАТУРА

1. Богульский И. О., Кочеров В. Н. *Моделирование контакта ледяного слоя с берегом при перепаде уровня воды.* Препринт ВЦ СО АН СССР. №18. г. Красноярск. 1983. 24 С.
2. Матвеев А. Д. *Многосеточное моделирование композитов нерегулярной структуры с малым коэффициентом наполнения.* ПМТФ. 2004. Т. 44. № 3. С. 161–171.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМЕРЗАНИЯ ЛЬДА НА ПОДВОДНОЙ ТРУБЕ ГАЗОПРОВОДА

Д. А. Медведев, А. П. Ериков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Рассматривается намерзание льда на подводной трубе, по которой протекает холодный газ. Характерное числа Рейнольдса для течения велико, течение заведомо турбулентное, и толщина пограничного слоя $\delta \sim L/\sqrt{\text{Re}}$ мала. Поэтому влиянием пограничного слоя на теплопередачу можно пренебречь и температуру жидкости можно считать постоянной и равной 0°C . Вначале рассматривается приближенная задача, в которой труба заменяется полуцилиндром радиусом R_0 , прилегающим к дну. Задача допускает аналитическое решение, если пренебречь нестационарностью распределения температуры внутри ледяной оболочки (поскольку характерное время установления распределения температуры гораздо меньше, чем характерное время нарастания толщины льда). Время, необходимое для нарастания ледяной оболочки с внешним радиусом R выражается формулой

$$\frac{2\kappa\Delta T}{\rho L}t = R^2 \left(\ln \frac{R}{R_0} - \frac{1}{2} \right) + \frac{R_0^2}{2}.$$

Характерное время равно $t_0 = \rho L R_0^2 / (2\kappa\Delta T)$, что при радиусе трубы $R_0/2 = 50$ см и разнице температур $\Delta T = 40$ К составляет около 22 суток. Для численного моделирования процесса использовался метод фазового поля [1], который позволяет решить задачу Стефана без явного выделения границы раздела фаз. Вводится переменная ψ (фазовое поле), которая непрерывно меняется от $\psi = -1$ в жидкой фазе до $\psi = 1$ в твердой. Скорость изменения фазового поля зависит от локальной кривизны границы и локальной температуры. Изменение геометрии и топологии границ учитывается автоматически. Были проведены расчеты намерзания льда вокруг цилиндрической трубы радиусом 50 см, лежащей на грунте. На Рис. 1 показана зависимость максимальной высоты ледяной оболочки от времени для различных ΔT .

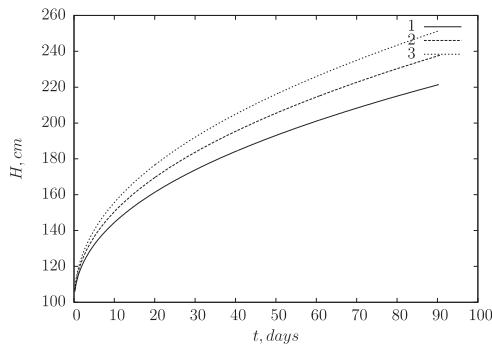


Рис. 1: Зависимость максимальной высоты ледяной оболочки от времени. Разница температур $\Delta T = 30$ К (1), 40 К (2) и 50 К (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Karma A., Rappel W.-J. *Quantitative phase-field modeling of dendritic growth in two and three dimensions*. Physical Review E. 1998. V. 57, N 4. P. 4323–4349.

ВОЛНЫ ПОДО ЛЬДОМ В АРКТИЧЕСКОМ ФИОРДЕ

Е. Г. Морозов¹, А. В. Марченко², С. В. Музылев¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

²*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва*

Проведены измерения около фронта ледника Тюна на Шпицбергене, сползающего рывками в фиорд. Измерения проводились в феврале 2011 г., когда фиорд был покрыт льдом. Приливные колебания достигали двух метров. В фазе отлива зарегистрирована волна цунами подо льдом, возбужденная подвижкой ледника в фиорде. Вертикальные смещения ледяного покрова равнялись 30 см. Период волны цунами равнялся 93 с, а ее длина 1850 м. Волна цунами возбуждена подвижкой ледника аналогично генерации волны цунами оползнями.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ МЁРЗЛЫХ ПОРОД ПРИ РАБОТЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин

*Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН*

Нормальная эксплуатация добывающих скважин, находящихся в районах залегания мерзлых пород, может быть нарушена в силу ряда причин: охлаждение труб в момент начала работы скважины, кавернообразование, неустойчивость приуставьевых площадок в период эксплуатации, интенсификация процесса образования твердой фазы (парафиноотложения и отложения газовых гидратов) и т.д. [1, 2, 3] Данные проблемы характерны и для скважин, которые эксплуатируются установками электроцентробежных насосов (УЭЦН).

Для адекватного моделирования течения нефтегазовой смеси в таких условиях необходимо учитывать как изменение термодинамических параметров при подъеме флюида по стволу скважины к устью, так и теплообмен скважины с мерзлыми породами с учетом образующейся зоны растепления многолетних мерзлых пород (ММП). В этой связи построена математическая модель восходящего двухфазного потока

в вертикальной скважине с УЭЦН. При этом учтены следующие взаимосвязанные факторы: гидродинамика и теплофизика течения углеводородной смеси; тепловое взаимодействие скважины с окружающей породой, в том числе мерзлой; отложения парафинов; скачкообразное изменение параметров потока вследствие работы электронасосного агрегата [4, 5]. На основе построенной модели разработан программный продукт по расчету основных параметров восходящего нефтегазового потока в такой скважине и распределения температуры окружающих скважину пород.

Численно исследованы закономерности увеличения радиуса протаивания ММП, окружающих нефтегазовую скважину с УЭЦН. Проведен анализ зависимости температурных полей вокруг такой скважины и темпов движения фазовых переходов в мерзлых породах от вида флюида и его поведения в межтрубном пространстве скважины, материала и толщины теплоизолирующего слоя на внешней стенке насосно-компрессорных труб, глубины погружения и расходной характеристики УЭЦН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проселков Ю. М. *Теплопередача в скважинах*. М.: Недра, 1975.
2. Даниэлян Ю. С., Шевелева Д. В. *Численное моделирование температуры нефти в скважине и зоны оттаивания многолетнемерзлых пород*. Нефтяное хозяйство. 2008. № 2. С. 78–80.
3. Аргунова К. К., Бондарев Э. А., Николаев В. Е., Рожин И. И. *Определение интервала гидратообразования в скважинах, пробуренных в многолетнемерзлых породах*. Нефтяное хозяйство. 2008.
4. Губайдуллин А. А., Мусакаев Н. Г., Бородин С. Л. *Математическая модель восходящего газожидкостного потока в вертикальной скважине*. Вестник Тюменского государственного университета. 2010. № 6. С. 68–75.
5. Мусакаев Н. Г., Романюк С. Н. Бородин С. Л. *Численное исследование закономерностей движения фронта фазового перехода в многолетнемёрзлых породах*. Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 6. С. 122–128.

СОВРЕМЕННЫЙ ЛЕДОВО-ЭКЗАРАЦИОННЫЙ РЕЛЬЕФ НА ШЕЛЬФЕ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА

*С. А. Огородов^{1,2}, В. В. Архипов^{1,2}, А. В. Баранская², А. П. Вергун²,
О. В. Кокин², А. В. Марченко^{1,3}, А. С. Цвецинский¹*

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Москва

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

³Университетский центр на Сvalьбарде, Лонгирбиен, Норвегия

При проектировании подводных трубопроводов и кабелей связи в арктических и других замерзающих морях необходимы достоверные оценки интенсивности воздействий ледяных торосистых образований на дно и глубины их внедрения в грунт. Среди прочих видов ледовых воздействий экзарация относится к категории наиболее опасных. Согласно определению, экзарация (выпахивание) — деструктивное механическое воздействие льдов на подстилающую поверхность грунта, связанное с динамикой ледяного покрова, его подвижностью, торошением и стамухообразованием под влиянием гидрометеорологических факторов и рельефа прибрежно-шельфовой зоны. Под динамическим воздействием ледяных образований формируются специфические формы ледово-экзарационного рельефа — борозды выпахивания и котловины выдавливания. Размеры и распространение этих форм являются косвенными признаками интенсивности экзарации. Недооценка величин экзарации дна может привести к повреждению инженерных сооружений, в то же время излишнее заглубление объектов сильно удорожает строительство.

В рамках многолетних научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ, выполненных ГОИН и МГУ под цели проектирования подводного перехода газопровода "Бованенково – Ухта" через Байдарацкую губу Карского моря, на основе геофизических методов (локатор бокового обзора, многолучевой эхолот, гидроакустический профилограф) и прямых водолазных наблюдений изучен механизм формирования ледово-экзарационного микрорельефа, получены параметры форм ледового выпахивания, выполнено районирование прибрежно-шельфовой зоны Западного Ямала по видам и интенсивности ледово-экзарационного воздействия. Съемка дна локатором бокового обзора позволяет дешифрировать на дне положение и количество ледово-экзарационных микроформ, их ширину и ориентировку, эхолотирование дает профиль, глубину борозд выпахивания и высоту бортиков обваловки, использование гидроакустического профилографа позволяет определить степень заполнения борозды наносами.

В результате проведенных исследований в Байдарацкой губе на глубинах от 12 до 26 м выявлены различные типы борозд выпахивания глубиной до 2 м, шириной одиночной борозды до 50 м, многокилевого выпаха (гребенки) до 300 м, длиной несколько километров. Пространственная ориентация борозд вдоль оси губы и реверсивный тип приливных течений показывают, что главная движущая сила для процесса ледовой экзарации связана с полусуточным приливом. На Харасавэйском участке, открытом для морского волнения, помимо линейно ориентированных борозд выпахивания выделены многочисленные хаотично ориентированные котловины выдавливания диаметром до 70 м, образовавшиеся в процессе застывания торосистых ледяных образований.

Выявлена четкая зависимость распространения и параметров ледово-экзарационных форм на дне от текущей глубины моря и морфологии поверхности дна. При прочих равных условиях, наибольшие интенсивность и глубина экзарации дна приурочены к мористой кромке припая, где в течение всего холодного сезона происходят торошения льдов и вдоль которой осуществляется дрейф ледяных полей с вмерзшими в них торосистыми образованиями.

ДИНАМИКА ТАЮЩЕГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СНЕЖНО-ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

A. A. Папин, M. A. Токарева

Алтайский государственный университет

Снежно-ледовый покров рассматривается как трехфазная сплошная среда, состоящая из воды, воздуха и льда. В основу математической модели положены уравнения сохранения массы для каждой из фаз, уравнения двухфазной фильтрации Маскета — Леверетта для воды и воздуха, уравнение теплового баланса и замыкающие реологические соотношения для льда [1, 2].

В докладе излагаются результаты об аналитических и численных решениях рассматриваемых задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственные контракты №14.740.11.0878, №14.740.11.0355).

ЛИТЕРАТУРА

1. Colbeck S. C. *A theory of water percolation in snow*. J. Glaciol. 1972. 11(63) pp. 369–385.
2. Папин А. А. *Разрешимость модельной задачи тепломассопереноса в тающем снеге*. Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 4. с. 13–23.

АБЛЯЦИЯ ДИАПИРОВ И МАССИВОВ МЕРЗЛОТЫ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

В.И. Пеньковский, Н.К. Корсакова

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Предложена математическая модель обтекания замкнутых включений (солевых диапиров, массивов мерзлоты, газогидратов) потоком агрессивного флюида (относительно пресной или теплой водой, теплым газом). Унос вещества (абляция) с поверхности включения предполагается пропорциональным касательной составляющей скорости обтекания. Задача сводится к нахождению гармонической функции и формы поверхности включения, на которой задано краевое условие смешанного типа. Получены аналитические решения некоторых плоских задач. Для

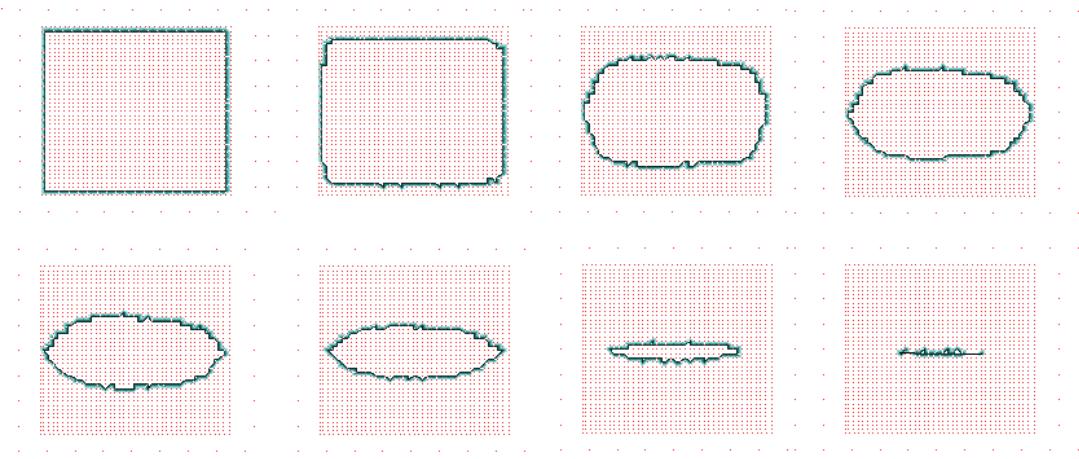


Рис. 1. Последовательные формы поверхности включения.

общего случая построен алгоритм численного решения, основанный на методе конечных элементов. На Рис. 1 показаны рассчитанные последовательные формы поверхности плоского включения (диапира).

Представлен предварительный прогноз динамики солевого диапира под основанием Рогунской ГЭС, которую предполагается построить на реке Вахш (Республика Таджикистан). Проведены лабораторные опыты. Экспериментальные исследования на щелевом лотке Хеле — Шоу (Рис. 2) качественно согласуются с данными математического моделирования.



Рис. 2. Лабораторный эксперимент по обтеканию модели диапира окружной формы.

Разработанная математическая модель не имеет аналогов. Подбором входящих в эту модель параметров (например, из натурных или лабораторных данных) она может быть применена к описанию ряда процессов — конвективного тепло- и массопереноса, разложения газогидратов и других, имеющих одну диффузионную природу. В случае плоского потенциального движения проблема сводится к новой краевой задаче с подвижной границей для аналитических функций. Предложенная математическая модель может быть применена для решения широкого круга проблем: прогнозирования динамики выщелачивания диапиров в виде включений каменной соли под основанием гидростанций типа Рогунской ГЭС, транспортировки айсбергов как источников питьевой воды, очистки прискважинной зоны газовых скважин от выпавших газогидратов а также динамики оттаивания включений вечной мерзлоты в водоносных пластах районов крайнего Севера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеньковский В.И., Корсакова Н.К. *Моделирование процессов абляции диапиров и массивов мерзлоты в потоке подземных вод.* Труды Международной конференции "Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика посвященной 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, 2011.
2. Пеньковский В.И., Корсакова Н.К. *Абляция непроницаемых включений в потенциальном потоке.* Теоретические и практические аспекты исследований природных и искусственных газовых гидратов. Сб.научн.тр. Якутск: Аксаан. 2011. С. 131–139.
3. Пеньковский В.И., Корсакова Н.К., Сатторов М.А. *Математическая модель процессов абляции диапиров.* Доклады АН Республики Таджикистан (математика). 2011. Т. 54. № 9. С. 724–731.
4. V.I. Pen'kovskii, N.K. Korsakova. Modeling Processes Of Diapir And Frozen Earth Massif Ablation In Ground Water Flow// International Conference "Modern Problems of Applied Mathematics and Mechanics: Theory, Experiment and Applications". May 30 – June 2011. Novosibirsk. P. 77–78.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ПАРАФИНОВ В ПОДВОДНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

A. Г. Петрова¹, A. A. Коробкин²

¹ Алтайский государственный университет, Барнаул

² Университет Восточной Англии

Для нефтепроводов, пролегающих по дну северных морей, актуальной является проблема выделения твердых парафинов из потока и осаждения их на стенах трубы. Нефть, поступающая в трубопровод, имеет температуру выше температуры морской воды. В процессе движения нефть охлаждается, что приводит к сегрегации парафинов в области, где температура ниже WAT (wax appearing temperature). При дальнейшем охлаждении на стенах трубы образуется состоящий из затвердевших парафинов неподвижный депозит. Если не проводить какую-либо очистку, возможна полная закупорка трубы.

В подавляющем большинстве работ, посвященных течению парафинированной нефти, изменение температуры, концентрации и поля скоростей вдоль трубы координаты не принимаются во внимание. Нашей целью является учет влияния аксиального переноса на распределение температуры и концентрации парафинов, а, следовательно, на процесс образование депозита. Рассматривается участок трубы вблизи входа, на котором формируется многослойная структура течения. Область

течения разбивается на несколько зон. Внутренней является ядро, занятое жидкой нефтью с растворенными парафинами. Далее ближе к стенкам выделяется область, в которой присутствуют сегрегированные парафины. Для моделирования течения в этой области, содержащей как жидкие, так и сегрегированные парафины, рассматриваются и сравниваются два подхода. Первый основан на модели жидкости Бингама с внутренней границей раздела, во втором среда считается несжимаемой жидкостью с переменной вязкостью, зависящей от концентрации сегрегированных парафинов. Наконец, выделяется пристеночный неподвижный слой, образованный затвердевшими парафинами. Перераспределение парафинов в потоке происходит за счет конвективного переноса и молекулярной диффузии. Характерный масштаб изменения потока в аксиальном направлении обратно пропорционален коэффициенту молекулярной диффузии парафинов и значительно больше радиуса трубы. Находятся асимптотические формы поверхностей, разделяющих фазы течения, распределения концентраций, температур и скоростей.

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ НАДЛЕДНЫХ МОСТОВ

С. Н. Попов, А. И. Герасимов

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск

Характерной особенностью автомобильных дорог северных территорий России является огромная протяженность зимников при практически полном отсутствии мостовых сооружений. При недостаточной толщине льда осенью в период ледостава или снижении прочности весной при перестройке структуры льда из монолитной в столбчатую транспортное сообщение прерывается. Продолжительность перерыва в действии переправ составляет по 1,5–2 месяца весной и осенью. Для ускорения введения в действие переправ в период ледостава, как правило, осуществляется искусственное намораживание льда. Однако такое утолщение ледового покрова недостаточно эффективно: с одной стороны, прочность этого льда существенно ниже прочности монолитного, а с другой стороны, намороженный рыхлый лед характеризуется пониженной теплопроводностью, что может при определенных погодных условиях привести к подтаиванию естественного ледового слоя.

В патентной и научной литературе известно достаточно много технических и технологических решений проблемы ускорения ввода и продления срока службы ледовых переправ. Однако большинство предлагаемых решений технически сложно или требует значительных затрат для реализации.

Для практического применения, по нашему мнению, возможны два подхода. Процесс ледообразования существенно интенсифицируется при обдуве очищенной от снега поверхности льда холодным атмосферным воздухом. Несущая способность тонкого льда может быть значительно увеличена при обеспечении распределения нагрузки по его поверхности.

В ИПНГ СО РАН проведены экспериментальные исследования возможности реализации предлагаемых способов.

Для обдува льда использовалась система, включающая электровентилятор, обдувающий поверхность льда под полиэтиленовой пленкой. Как показали эксперименты, в зависимости от температуры окружающего воздуха скорость прироста толщины льда при этом возрастает в 3–3,5 раза, что существенно влияет на ускорение ввода ледовых переправ в эксплуатацию.

С целью обеспечения равномерного распределения нагрузки автомашин на лед разработаны и испытаны различные конструктивные варианты надледных мостов. Основной задачей при этом являлось исключение примерзания деталей моста ко льду и возможности их разрушения при демонтаже. Для решения проблемы использовались различные криофобные покрытия и полимерные пленки.

Результаты испытаний показали, что наиболее перспективными являются щитовые конструкции из древесины с использованием в качестве криофобной защиты армированной полиэтиленовой пленки. Проведенными испытаниями показана возможность продвижения по льду толщиной 10 см автомашины весом 10 т.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ПРИМЕСЕЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО ФАКЕЛА

B. F. Raputa

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск*

Основные источники газоаэрозольного загрязнения территорий севера Западной Сибири представлены предприятиями нефтегазового комплекса и автотранспортом. Характерными загрязняющими веществами являются углеводороды, природный газ, оксид и диоксид углерода, сернистые соединения, окислы азота, фенолы, меркаптаны и т.д. Интенсивное развитие нефтегазодобывающего комплекса приводит к значительному техногенному влиянию на окружающие территории. В связи с этим необходима разработка комплекса мер как по повышению экологической безопасности и снижению вредного воздействия на окружающую природную среду, так и эффективного контроля объемов сжигания попутного нефтяного газа.

В докладе обсуждаются результаты экспедиционных, химико-аналитических и численных исследований процессов аэрозольных выпадений в снежный покров атмосферных выбросов примесей от факельных установок Приобского и Приразломного нефтяных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа.

Исследуемые факела относятся к числу наиболее мощных и постоянно действующих. Маршрутный отбор снеговых проб проводился в конце зимних сезонов 2004–2007 гг. с учётом характеристик факелов, особенностей местности, системы дорог, зимней розы ветров. В число измеряемых компонентов аэрозольных выпадений на снеговой покров входили химические элементы, полиароматические углеводороды, компоненты ионного состава.

С использованием постановок обратных задач переноса примеси в приземном слое атмосферы проведено теоретическое исследование процессов формирования длительного аэрозольного загрязнения местности в окрестностях точечного источника. При построении модели реконструкции полей выпадений существенно используются свойства подобия процессов распространения примеси и статистические характеристики ветрового и турбулентного режимов в приземном слое атмосферы. Для повышения точности оценивания параметров моделей и полей загрязнения использованы методы оптимального планирования регрессионных экспериментов.

На основе данных маршрутных наблюдений в окрестностях нефтегазовых факелов и малопараметрических описаний процессов распространения примеси проведена численная реконструкция полей длительного загрязнения местности различными её компонентами. Полученные оценки параметров позволяют вычислить количество суммарных выпадений аэрозольных примесей за рассматриваемые зимние сезоны. В ряде случаев проведено сопоставление полученных оценок суммарных выпадений примесей с данными фактических объёмов сожжённого попутного нефтяного газа.

Разработанные модели восстановления полей дают возможность проводить косвенный контроль факельных выбросов по ограниченному числу точек пробоотбора. Проведённые экспериментальные исследования и апробация предложенных моделей реконструкции показала их экономичность и вполне удовлетворительную точность восстановления полей длительного многокомпонентного загрязнения местности, их следует использовать для проведения регулярного мониторинга факельных выбросов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Президиума РАН № 4.4.

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В “ТРАНЗИТНЫХ ЗОНАХ”

Г. В. Решетова¹, В. Г. Хайдуков², В. А. Чеверда²

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск

При производстве сейсмических наблюдений в зимний период в "транзитных зонах" которыми называют мелководные водоемы на севере Западной Сибири, возникает серьезная проблема, связанная с появлением специфической помехи, слабозатухающей как по протяженности, так и по времени. Означенная помеха возникает только в том случае, когда вся расстановка (источник и приемники) располагается на ледяной поверхности водоема. В других случаях рассматриваемая помеха не возникает, и сейсмический материал имеет вполне приемлемое качество, позволяющее выделить полезные события почти на всем интервале регистрации. Интенсивность помехи настолько велика, что она полностью маскирует отражения на всем интервале полезных сигналов. Ее происхождение не поддается объяснению на основе общепринятых лучевых представлений и имеющихся данных физического моделирования. Использование известных в сейсморазведке способов подавления шумов как на стадии наблюдения, так и обработки не приводит к заметному улучшению качества полевого материала.

Изучение известных теоретических результатов исследований по распространению упругих волн в тонких пластинах [1],[2] и применение численного моделирования для различных двух- и трехмерных упрощенных и реалистичных моделей среди позволило объяснить происхождение этой помехи. Исследование различных способов возбуждения сейсмических волн позволило найти возможность ее ослабления при используемом методе производства наблюдений. Моделирование проводилось на основе конечно-разностных методов. Специфика неоднородностей реалистичных моделей потребовала задания очень мелкого шага дискретизации моделей, значительно более мелкого, чем тот, который требуется для минимизации численной дисперсии, и соответствующего шага расчетной сетки. Это в свою очередь потребовало создания и реализации алгоритмов параллельных вычислений на многопроцессорных системах [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Исакович М. А. *Общая акустика*. М.: Наука, 1973.
2. Осборн М., Харт С. *Распространение экспоненциального импульса в стальной пластине, погруженной в воду*. Вопросы сейсмической разведки. 1953. ИЛ, Москва.
3. Guilbot J., Khaidukov V., Landa E., Reshetova G., Tcheverda V. *Finite-difference simulation of elastic waves propagation in multiscale media on the base of local grid refinement*. 78th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts. 2008. Р. 2062–2066.

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАНГИДРАТОВ В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

M. E. Семенов, Е. Ю. Шиц

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск

Исследование особенностей получения синтетических газовых гидратов с высоким содержанием в них газа-гидратообразователя на сегодняшний день можно считать одним из перспективных технологических направлений, которое подразумевает вывод газовых технологий на принципиально новый качественный уровень. Так, актуальными остаются решения проблем, связанных с эффективным хранением, транспортом и переработкой углеводородов, аккумулированных в форме их гидратов. Так как основное количество добываемого природного газа приходится на долю газа, который на 98–99% состоит из метана, то целью нашей работы являлось прежде всего получение гидрата метана. Известно, что основной проблемой при получении газовых гидратов в лабораторных и в полупромышленных установках является низкая скорость процесса их образования. Для повышения скорости этого процесса используются различные технологические приемы, позволяющие интенсифицировать этот процесс за счет увеличения поверхности контакта фаз, основанные, как правило, на принципе движения потоков той или иной фаз: тонкодисперсное распыление воды или растворов, содержащих химические реагенты типа ПАВ в объем газа, интенсивное перемешивание таких систем и барботирование. Однако, кроме проведения исследований, связанных с влиянием механизмов перечисленных процессов на условия гидратообразования, для их фактического осуществления необходима разработка и использование специального технологически сложного и энергоемкого оборудования. На основании этого нами была предпринята успешная попытка произвести получение гидрата метана в закрытой системе, а в качестве движущей силы процесса использовать температурный фактор. Из дополнительных технологических приемов, повышающих скорость гидратообразования применялись раствор ПАВ, в качестве которого использовался сульфонол, и специальная металлическая конструкция, которая помещалась внутри камер. Таким образом, в результате проведенных исследований были получены гидраты метана с газонасыщенностью не менее 70%. Установлено, что в условиях свободной конвекции применение раствора сульфонола способствует существенному повышению газонасыщенности, тогда как использование дополнительной металлической поверхности внутри камеры приводит к уменьшению продолжительности процесса образования гидрата метана. Комбинирование этих технологических приемов позволяет в 2 раза сократить продолжительность процесса получения метангидрата. Кроме того, проведенные исследования позволили получить непосредственную информацию о нативной структуре искусственно полученных метангидратов. Так, нами были получены кристаллогидраты в виде массивных, вискерных, спиралевидных, игольчатых и нитевидных структур.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И РАЗРУШЕНИЕ ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ

Х. Н. Семенов, В. Н. Петров

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск

В данной работе на основе подходов классической механики испытания материалов, линейной механики разрушения, динамической механики разрушения и физической механики испытания материалов предлагается разработка методики определения локализации деформационных процессов в элементах массивных конструкций, обусловленных внезапными перегрузками, перепадами климатических температур и порывистыми ветрами в условиях Севера и Арктики.

Для наглядности рассматривается внезапное катастрофическое разрушение резервуара емкостью 5000 м³ при температуре минус 35°C, полностью загруженного продуктом. Картина аварии реконструирована по траектории распространения магистральной трещины и кристаллографическому характеру разрушения, поверхности стенки корпуса резервуара. Трещина возникла из непровара шва корпуса люка-лаза, соответственно сварной шов с дефектом непровара оказался в области максимальной концентрации напряжений со сложной системой деформирования. При этом следов усталостной трещины, стабильного подрастания или пластической утяжки не обнаружено. Отмечено, что возможность динамического нагружения исключена.

В целях изучения кинетики сложных механизмов проявления локальных линий высокой интенсивности деформирования и их локализации в элементарных объемах деформирования будут рассмотрены три основных момента деформирования:

- 1) энергетические, силовые и деформационные критерии вскрывающихся свободных полостей “бегущей” трещины;
- 2) деформации, сопутствующие фронту развития “бегущей” трещины, обусловленные вскрывающимися свободными поверхностями трещины;
- 3) проявление и развитие предшествующей деформации — локальной линии высокой интенсивности деформирования, опережающей фронт развития “бегущей” трещины.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СУДАМИ ЛЕДОВОГО КЛАССА

A. M. Сергеева, A. B. Ткачева

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Владивосток

Работа направлена на исследование ледоразрушающей способности судов ледового класса. Моделирование и исследование возникновения деформаций, зарождения

и эволюции процесса нарушения сплошности ледового покрова рассматривается на примере нового запатентованного ледового судна [1]. Лед принимается однородной трансверсально-изотропной упругой средой. Используя теории малых упругих деформаций и определенного численного метода, предложенного в работе [1], строится математическая модель, приводятся алгоритмы вычисления образования и развития трещин [2]. В результате работы выявлены оптимальные геометрические параметры устройства, которые способствуют увеличению ледоразрушающие способности судна.

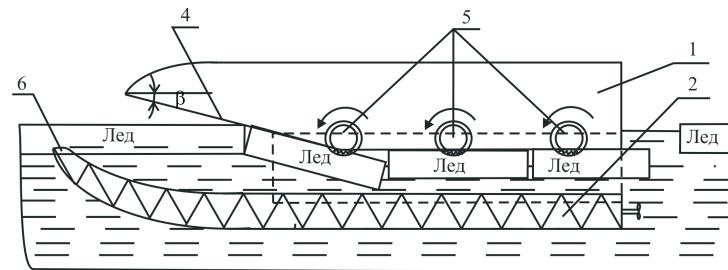


Схема ледокольного судна.

Схема технически сложного ледокольного устройства изображена на рисунке. Ледокол состоит из надводной части 1, подводной части 2 и двух боковых частей 3. В надводной части расположены система управления, пассажирский салон. Носовая область наклонена под углом к горизонту и имеет резцы 4, а также систему фрез 5 по всей нижней поверхности. Подводная часть имеет спереди резец 6, отсеки для воздуха, топлива и движителя судна. Боковые части содержат систему коммуникаций, гидропривод перемещения в вертикальной плоскости надводной части относительно подводной, имеют спереди клинья 7 для врезания и ломки льда и вертикальные фрезы 8. Расстояние между надводной и подводной частями должно быть не менее, чем $1.5S$, где S — толщина ледяного покрова. перед началом движения судна Эта величина задается системой гидроцилиндров, установленных в боковых частях, перед началом движения судна.

На базе предлагаемых алгоритмов и программ для ЭВМ, позволяющих производить соответствующие вычисления, можно осуществлять теоретические исследования суден ледового класса с целью их усовершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

- Пат. 2276037 РФ МПК В 63 В 35/08. *Ледокольное судно* / Одиноков В.И., Колмогоров В.Л. — № 2004114052/11; Заяв. 06.05.2004; Опубл. 10.05.2006, Бюл. № 13.
- Одиноков В. И., Сергеева А. М., Захарова Е. А. *Построение математической модели для численного анализа процесса разрушения ледяного покрова*. Математическое моделирование. 2008. Т. 20. № 12. С. 15–26.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ МЕХАНИКА И ДИНАМИКА МОРСКИХ ЛЬДОВ

В. Н. Смирнов

Арктический и антарктический НИИ, г. Санкт-Петербург

Представлен обзор результатов изучения морского льда по двум направлениям.

1. Мониторинг естественных динамических процессов в морских льдах [1]. Приводится информация о физико-механических процессах во льдах на основе инструментальных наблюдений на дрейфующих станциях “Северный Полюс” и в Антарктике. Обнаружены периодические горизонтальные подвижки на значительных пространствах, относящиеся к классу автоколебательных процессов. Механика физико-механических процессов в системе “лед–лед” очень схожа с процессами в системе “лед–сооружение”: прерывистое дробление/прорезание контактов ледяных полей, при которых проявляются режимы резонансных явлений, хаотических колебаний, ударов. При сжатии льдов выявлены прогностические признаки возникновения протяженных разломов. Взаимодействие айсберга с дрейфующим морским льдом сопровождается крупномасштабными явлениями stick slip. С учетом массы айсберга глобальные динамические силы взаимодействия с морским льдом достигали 1500 МН. Процессы сжатия и разрушения морских льдов сопровождаются широким спектром упругих колебаний и волн. Как правило, после мощных торошений возникают колебания льда, обусловленные гравитационными короткопериодными внутренними волнами океана.

2. Решение прикладных задач инженерной ледотехники [2]. Традиционный подход к расчету несущей способности льда и ледовых нагрузок на морские сооружения основывается на испытаниях прочности образцов льда. Однако масштабный эффект во льду не позволяет однозначно судить о реализуемой прочности льда в натурных условиях и при различных сценариях воздействия. Примером проведения крупномасштабных испытаний являются работы на сахалинском шельфе в 1998 г. Диаграммы “нагрузка–смещение” отражают процесс разрушения тороса на этапах упруго-пластического деформирования, разлома и сдвига. Получены реальные величины сил сцепления и угла внутреннего трения в объеме смерзшихся обломков льда. Другим примером является технология определения прочности льда на сжатие в скважине (*in situ*). При этом измеряются разрушающие напряжения во льду с помощью зонд-индентора, который опускается в скважину на глубину до 5 метров. Картина механики разрушения дополняется акустическими импульсами при трещинообразовании. Коэффициент сравнения между скважинной прочностью и прочностью образцов для различных льдов составляет 4.6. Результаты скважинных испытаний являются основой для разработки метода определения полномасштабной (на всю толщу) прочности ледяных образований на сжатие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. Н., Ковалев С. М., Нюбом А. А., Соболевский К. В. *Исследование физики и механики морского льда при динамических процессах в системе лед–вода–атмосфера по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”*. Тр. МПГ 2007/08, Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. С.395–405.

2. Смирнов В. Н., Ковалев С. М., Шейкин И. Б., Шушлебин А. И. *Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и сооружения*. ГНЦ РФ ААНИИ. 2011.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПОГРУЖЕННОЕ ТЕЛО ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОД ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ

И. В. Ступрова

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В последние годы значительно возрос интерес к освоению полярных районов Мирового океана. В связи с этим появилась необходимость в решении новых задач, посвященных процессам волнообразования в сплошном ледяном покрове. Ранее достаточно подробно была исследована задача о движении внешней нагрузки по поверхности льда, однако воздействие движущегося погруженного тела и действующие на него гидродинамические нагрузки еще мало изучены. В настоящее время известны лишь работы, в которых определены коэффициенты присоединенной массы и демпфирования при чисто колебательном движении горизонтального цилиндра в линейно стратифицированной жидкости [1] и сферы в однородной и двухслойной жидкостях [2, 3, 4].

В данной работе решена задача о суперпозиции колебательного и поступательного движения погруженной сферы под ледяным покровом в однородной бесконечно глубокой жидкости. Жидкость предполагается невязкой и несжимаемой. Ледяной покров моделируется тонкой упругой пластиной, находящейся в состоянии равномерного растяжения или сжатия. В рамках линейной потенциальной теории волн для решения этой задачи необходимо сначала рассмотреть стационарную задачу о равномерном движении тела, а затем задачу о колебательном движении при наличии хода. Использован метод мультипольных разложений, примененный ранее [5] для исследования движения сферы под свободной поверхностью. Для стационарной задачи определены волновое сопротивление и подъемная сила, действующие на сферу, а также распределение прогибов и напряжений в ледяном покрове. Для колебательного движения по трем возможным степеням свободы вычислены коэффициенты присоединенных масс и демпфирования в зависимости от толщины льда, сжимающих усилий, частоты колебания и скорости движения сферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ступрова И. В. *Гидродинамические нагрузки, действующие на колеблющийся цилиндр, погруженный в стратифицированную жидкость, при наличии ледяного покрова*. ПМТФ. 2011. Т. 52. № 3. С. 102–115.

2. Das D., Mandal B.N. *Water wave radiation by a sphere submerged in water with an ice-cover.* Arch. Appl. Mech. 2008. V. 78. N 8. C. 649–661.
3. Das D., Mandal B.N. *Wave radiation by a sphere submerged in a two-layer ocean with an ice-cover.* Appl. Ocean Res. 2010. V. 32. N 3. C. 358–366.
4. Mohapatra S., Bora S. N. *Radiation of water waves by a sphere in an ice-covered two-layer fluid of finite depth.* J. Advanced Res. Appl. Math. 2010. V. 2. N 1. C. 46–63.
5. Wu G. X. *Radiation and diffraction by a submerged sphere advancing in water waves of finite depth.* Proc. R. Soc. Lond. A. 1995. V. 448. N 1932. C. 29–54.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫМИ УСЛОВИЯМИ В РУСЛАХ РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Н. И. Тананаев

Игарская геокриологическая лаборатория — филиал ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

Существование сквозных таликов под руслами крупных рек криолитозоны не исключает наличия массивов сезонно- и многолетнемёрзлых грунтов в границах пойменных бровок. Они приурочены к аллювиальным макроформам руслового рельефа, в пределах которых существуют гидравлические условия для накопления тонкодисперсного взвешенного материала. Анализ материалов гидрографических исследований позволяет определить основные тенденции развития таких русловых форм, дифференцировав их по положению в структуре русла. Для побочней характерно медленное смещение вниз по течению их низовых частей при относительной стабильности напорного ската, сопровождающееся общим нарастанием ширины русловой формы, её выдвижением в поток. Развитие осерёдков, определяющееся условиями их рассечения потоком, связано с нарастанием их ширины (в верховой или, много реже, низовой части), осесимметричным относительно продольной оси русловой формы. Формирующиеся при этом “крылья” осерёдка могут продолжать своё развитие, смещаясь вниз по течению в виде вытянутых кос. Криогенно-обусловленная динамика русловых макроформ часто считается негативным фактором водопользования. Связанные с ней затраты на руслоустроительные работы на некоторых участках рек могут превышать десятки миллионов рублей в год. Очевидно, что мёрзлое состояние аллювиальных форм является заметным естественным регулятором руслоформирующей деятельности рек и, следовательно, может быть использовано в гидротехнической практике. Принципы использования многолетнемёрзлых грунтов в организации гидротехнических мероприятий в целом схожи с принципами использования мёрзлых грунтов как оснований в строительстве. При сохранении русловых форм в мёрзлом состоянии (Принцип I) в проектах гидротехнических мероприятий

следует учитывать рассмотренные выше тенденции развития отдельных русловых форм, используя их для повышения эффективности проектируемых сооружений. В качестве удачных примеров следует упомянуть проект берегозащитных мероприятий пос. Зырянка на р. Колыма, пос. Усть-Татта на р. Алдан, перспективный план берегозащиты пос. Нижний Бестях на р. Лена. Удачным решением для примыкающих к пойменным бровкам насыпных объектов (шпор, полузапруд) может стать установка в их тело охлаждающих установок для обеспечения устойчивого смыкания мёрзлого ядра сооружения с пойменным массивом мерзлоты. К этому принципу следует отнести также искусственное создание аллювиальных форм с целью их последующей криогенной фиксации. Примером реализации такого подхода является укладка отвалов дночерпательного флота для обеспечения долговременной устойчивости судового хода в пределах перекатного участка, либо для защиты береговой линии от интенсивного размыва. Принцип II заключается в направленном повышении температур в толще аллювиального массива с целью деградации его мёрзлого “ядра” и приведения данного участка русла в соответствие с динамической структурой потока. Теоретические и экспериментальные вопросы применения этого принципа разработаны пока слабо.

ДЕФОРМАЦИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ПРИЛИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, А. В. Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Объектом исследования являлись особенности смещений, деформирование и разрушение ледовых полей озера Байкал. Изучались скорости деформаций, свободные колебания ледовых блоков, отражение воздействия эффектов приливов и сейш озера на смещения ледового покрова. Известно, что ледовый покров озера Байкал расчленяют малые и большие трещины. Изменения ледового покрова отличаются высокой скоростью нарастания мощности, при этом наблюдается как пластическое деформирование, так и хрупкое разрушение ледовых блоков. Известно, что озеро Байкал расположено в центре Азии. Длина озера 636 км, а его ширина изменяется от 25 км до 80 км. Зимний период продолжается 180 дней, ледовый покров на озере устанавливается с декабря–января по май–июнь. Толщина льда нарастает с января по март и в южной части озера в районе Листвянки обычно достигает $0.7 \div 1.2$ м. Распределение ветров, температур и течений в различных частях озера, сезонные вариации уровня и конфигурация береговой линии определяют типичное положение магистральных трещин ледового покрова озера, окаймляющих и пересекающих его. Изучение особенностей их движения и разрушения льда проводилось в период зимних экспедиций на льду озера и в п. Листвянка. Для проведения измерений использовались светодальномеры и GPS приемники, датчики уровня и сейсмографы. Экспериментальные результаты получены в период зимних экспедиций (2005–2006–2007–2008) на льду озера и в Листвянке (с конца 2006 до начала 2008 г.). В работе проанализированы

процессы смещения ледового покрова озера, накопления деформаций и разрушения (разрыва) вдоль магистральных трещин длиной до 20 км. При этом свободные колебания ледовых полей (минутные периоды с амплитудой до 12 мм) моделируются одномерной моделью блоков с вязко-упругими связями, деформирование в зоне трещин рассматриваются в рамках упругой двухмерной модели. Приливные явления рассматриваются в рамках статической теории с выходом на размеры впадин озера Байкал. Сезонные изменения уровня озера в различные годы варьируют от 0.7 м до 1.2 м, приливные амплитуды в пункте Листвянка составляют от 7.9 мм (полусуточная волна M2) до 20.9 мм (двухнедельная волна Mf), для сейш двойная амплитуда первой моды (период 4.6 часа) достигала 60 мм. Получены упругие модули льда, скорости смещений ледовых полей и значения их собственных периодов, скорости накопления деформаций, описан процесс разрушения вдоль трещин, получены энергетические характеристики разрушения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАКЛАДКИ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА В ДОННЫЙ ГРУНТ С ИНТЕНСИВНОЙ ЛЕДОВОЙ ЭКЗАРАЦИЕЙ

О. Я. Тимофеев¹, И. В. Степанов²

¹ФГУП "ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова Санкт-Петербург

²ОАО "Гипроспецгаз Санкт-Петербург

В предлагаемой статье рассматривается проблема назначения глубины закладки трубопровода в арктических акваториях, дно которых "пропахивается" дрейфующими ледовыми образованиями большой массы. По нормам строительства необходимо исключить контакт трубопровода и киля ледового образования. Скорость дрейфа, масса и направление дрейфа являются случайными величинами. Детерминированная часть исходной информации — данные по грунтам и глубинам на проектной трассе трубопровода. Поставленная задача решается в вероятностной постановке методом стохастического моделирования. Глубина закладки назначается по критерию заданной надежности трубопровода.

ПАДЕНИЕ ТЕЛА С ПЛОСКИМ ДНОМ НА ТОНКИЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ

Л. А. Ткачева

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Рассматривается задача об ударе ящика по тонкому слою жидкости под малым углом в плоской постановке. Ящик падает вертикально вниз, не деформируется. В

начальном положении жидкость находится в покое, ящик касается поверхности жидкости одной точкой. Остальная часть поверхности жидкости свободна. Жидкость предполагается идеальной, несжимаемой, течение ее потенциально. В начальный момент времени ящик начинает погружаться с заданной скоростью, а жидкость вытесняется и бьет двумя струями: правая струя вдоль поверхности ящика, а левая струя вдоль нижнего основания и, сталкиваясь с неподвижной основной частью жидкости, поднимается вверх.

Предполагается, что толщина слоя жидкости значительно меньше размеров ящика, угол наклона ящика мал. Используются нелинейные уравнения мелкой воды. При решении задачи используется теория удара тела по тонкому слою жидкости, построенная в [1, 2]. Область течения жидкости разделяется на пять подобластей. Применяется метод срашиваемых асимптотических разложений. В случае, если точка отделения струи достигает противоположного конца ящика, граничное условие в этой точке меняется, ставится условие равенства давления нулю. Правый конец ящика начинает погружаться в воду, струя жидкости начинает бить вверх, и справа реализуется такая же картина течения жидкости, как для левой струи. Получена система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается методом Рунге — Кутты четвертого порядка.

Расчеты показали, что при некоторых значениях входных параметров задачи давление вблизи нижнего конца ящика понижается и становится меньше атмосферного. В тот момент, когда градиент давления на нижнем конце меняет знак, воздух проникает под ящик и занимает область пониженного давления. Происходит отрыв жидкости от дна ящика и осушение нижнего конца. В этот момент меняются краевые условия. На левой границе области контакта жидкости и тела ставятся условия равенства нулю давления и производной давления по горизонтальной координате.

Приводятся примеры расчетов, демонстрирующие, что все параметры задачи (масса, форма и размеры, угол наклона и скорость ящика, толщина слоя) существенно влияют на характер движения тела. Ящик может поворачиваться, угол наклона может менять знак. Анализируется влияние отрыва жидкости на характер движения тела.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00076а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Korobkin A. *Shallow-water impact problems*. J. Engng Math. 1999. V.35. № 1–2. P. 233–250.
2. Korobkin A. *Impact of two bodies one of which is covered by a thin layer of liquid*. J. Fluid Mech. 1995. V.300. P. 43–58.

РАЗРАБОТКА ГАЗОГИДРАТОВ СОВРЕМЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

C. B. Хабиров

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Запасы углеводородного сырья на континенте уменьшаются, поэтому приходится добывать его на шельфе и разрабатывать способы его добычи на подводных склонах [1]. Возникает сложная техническая задача: как с глубоководного дна (до 1 км глубины) добывать газ, находящийся там в твердом газогидратном состоянии. Мы предлагаем добывать газогидраты на основе следующих существующих современных технологий: 1) тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые изготавливают из отработанного ядерного топлива АЭС; 2) транспортировка жидкой пульпы и сжиженного газа в скважинах и гибких трубопроводах; 3) применение центрифуги для разделения газа, жидкости и примесей из пульпы; 4) устройство по сжижению газа путем прохождения газа под давлением через упругую пористую среду при умеренном переохлаждении; 5) гибкие трубопроводы большого давления; 6) плавающая затопленная платформа для накопления сжиженного газа; 7) плавающий причал для танкера; 8) подводная станция из современных прочных материалов; 9) автоматическая система управления; 10) микросейсмика для разведки трещин и контроля за разгазированием газогидратного пласта.

Мы исходим из того, что газогидраты образовались из газа, выходящего из трещин на дне под действием давления и переохлаждения. Трещины забиты гидратом, но могут освободиться в процессе добычи. Поэтому процесс разгазирования необходимо контролировать микросейсмикой.

Подвижная граница разгазирования может достигать источника газа, что вызовет спонтанный неуправляемый процесс, который приведет к экологической катастрофе. Поэтому важно создать математическую модель [2] и провести расчеты, прежде чем приступать к технической реализации проекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-01-00026-а, 11-01-00147-а, 12-01-00648), а также грантов НШ-6706.2012.1 и 11.G34.31.0042 правительства РФ по постановлению № 220.

ЛИТЕРАТУРА

1. Российский химический журнал. 2003. Т. 47. № 3.
2. Хабиров В. В., Хабиров С. В. *Разработка газогидратов современными технологиями*. Труды института механики. Выпуск 7. Уфа: Гилем. 2010. С.202–210.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ВЯЗКИХ СРЕД В СОЧЛЕНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ

C. H. Харламов^{1,2}, P. A. Альгинов^{2,3}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
МНОЛ "Нефтегазовая гидродинамика и тепломассообмен"

³ОАО "ТомскНИПИнефть"

Трубопроводный транспорт во всем мире является отраслью, требующей высоких финансовых затрат. С целью оптимизации работы трубопроводного парка не прекращаются исследования в том числе и по физико-математическому моделированию процессов транспорта жидкых и газообразных сред по трубопроводам [1].

В настоящем исследовании проведено численное моделирование эффектов перераспределения потока вязких сред в узлах соединения трубопроводов (тройниках). В ходе исследования решалась система определяющих уравнений, осредненных по Рейнольдсу, замкнутая с использованием двухпараметрических статистических моделей турбулентности типа $k - \varepsilon$, $k - L$ [2].

Полученные результаты свидетельствуют о несимметричном по сечению ускорении потока вблизи входа в боковой патрубок с образованием рециркуляционных зон в областях отрыва потока от основной линии и набегания потока на стенку патрубка. Наблюдается неравномерное по расходу разделение потока в условиях равенства диаметров основной линии и патрубка. Данная особенность течений объясняется образованием сильного турбулентного вихря в боковом патрубке.

Исследуется детальное изменение локальных и интегральных параметров турбулентного течения, определяются вклады механизмов конвекции, диффузии порождения и диссиляции в энергетическом балансе изменений турбулентных величин с целью уяснения особенностей течений и уточнения замыкающих соотношений для членов высшего порядка в моделях турбулентности второго порядка с транспортными уравнениями для компонент полного тензора напряжений Рейнольдса.

Наиболее интенсивное воздействие потока на стенку наблюдается на "шайке" тройника — в месте подключения патрубка в магистраль, а также на поперечном сварном шве бокового патрубка. Отмечается обратная зависимость интенсивности удара потока от радиуса скругления "шайки". Полученные результаты объясняют экспериментально известный факт меньшей надежности тройниковых соединений, выполненных без скругления в месте присоединения бокового патрубка, а также служат практической рекомендацией по оптимальной форме данных деталей.

Указываются зависимости по учету потерь напора в тройниках при проектировании трубопроводных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang L., Wu Y., Zheng Z., Guo J., Zhang J., Tang C. *Oil-Water Two-Phase Flow Inside T-junction* // Journal of Hydrodynamics. 2008. P. 147–153.

2. Kharlamov S.N. *Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines* (academic book). Rome, Italy: Publ. House "Ionta" 2010. 263 p.

ПРОБЛЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ НАЛИЧИИ ВКЛЮЧЕНИЙ И ТРЕЩИН

A. M. Хлуднев

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет*

Рассматриваются задачи о равновесии упругих пластин, содержащих включения и трещины. На берегах трещины задаются нелинейные краевые условия, обеспечивающие взаимное непроникание берегов. При этом включение может быть как упругим, так и жестким. Обсуждаются различные постановки задач равновесия и оптимального управления. В качестве управления может выступать форма включения, а функционал качества может совпадать с производной функционала потенциальной энергии по длине трещины [1] — [4]. С точки зрения критерия разрушения Гриффита оптимальное включение в этом случае является наиболее безопасным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 10-01-00054) и ФЦП "Кадры" (код проекта П597).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойгеринг Г., Хлуднев А. М. *О равновесии упругих тел, содержащих жесткие включения*. ДАН. 2010. Т. 430. № 1, С. 1–4.
2. Khludnev A. M. *Optimal control of crack growth in elastic body with inclusions*. European Journal of Mechanics — A/Solids. 2010. V. 29. N 3, P. 392–399.
3. Khludnev A. M., Leugering G. *Optimal control of cracks in elastic bodies with thin rigid inclusion*. ZAMM. 2011. V. 91, N 2, P. 125–137.
4. Хлуднев А. М. *Задачи теории упругости в негладких областях*. М.: Физматлит, 2010.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА

В. Г. Цуприк

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

В работе исследуются физические процессы разрушения морского поликристаллического льда при внедрении в него твёрдого тела. Цель исследований — удельная энергия механического разрушения этого природного материала. Основная задача исследования — подтверждение гипотезы о том, что минимально необходимое количество упругой энергии, высвобождающейся вследствие хрупкого разрушения и приходящейся на единицу объёма льда при постоянных параметрах его физического состояния, является для него величиной постоянной, как для материала.

Выбрана математическая модель, описывающая процессы разрушения морского льда в массиве льдины и его дробления (смятия) на контакте с поверхностью тела. Эта модель основана на нескольких вполне реальных для морского льда допущениях: элементарный объём льда остаётся упругим вплоть до момента разрушения и может находиться только в двух состояниях — в неразрушенном и разрушенном; до разрушения лед рассматривается как упруго-хрупкое тело, а разрушенный лёд в виде ледяной крошки ведёт себя как упруго-пластическое тело; переход из не разрушенного состояния в разрушенное происходит по некоторой поверхности разрушения в физическом пространстве, которая является поверхностью сильного разрыва для напряжений и деформаций и разделяет полупространство (массив льда) на два объёма, материал в которых имеет различное физическое состояние.

С учетом принятых допущений внедрение жёсткого тела в полупространство из льда рассматривается как циклический процесс послойного разрушения льда. Количество циклов непрерывного послойного разрушения льда находится в прямой зависимости от запаса кинетической энергии внедряющегося тела, расходуемой в процессе контактного разрушения льда. Теоретическое рассмотрение циклического процесса динамического внедрения жёсткой сферы в массив морского льда показало скачкообразный (периодический) характер изменения всех физических параметров, характеризующих этот процесс, за исключением изучаемой величины удельной энергии механического разрушения льда.

Для определения численных значений удельной энергии механического разрушения морского льда были проведены комплексные экспериментальные исследования по изучению процесса динамического внедрения металлических сфер большого диаметра в поверхность натурного ледяного покрова. Анализ результатов экспериментов полностью подтвердил гипотезу циклического разрушения массива льда в месте контакта в процессе одиночного удара жёсткой сферы и постоянства удельной энергии механического разрушения льда при постоянстве параметров его физического состояния.

Практическим приложением результатов такого исследования может стать разработка рекомендаций по определению прочности льда методами его испытаний в

массиве. Величина удельной энергии механического разрушения льда может рассматриваться в качестве постоянной величины для морского льда и использоваться в расчётах нагрузки на морские гидротехнические сооружения в качестве расчетной прочностной характеристики льда.

ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОХОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

B. A. Шлычков

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал)

Представлена гибридная динамико-стохастическая модель весеннего ледохода, в которой параметры течения в русле воспроизводятся на основе детерминированной численной модели, а плывущие по реке льдины рассматриваются как разномасштабные элементы стохастического ансамбля. При этом траектория отдельного ледового элемента прогнозируется индивидуально с учетом взаимодействия с близлежащими льдинами, берегами и элементами плавучих конструкций.

Для расчета динамических параметров потока используется численная модель плановых течений на основе двумерных уравнений Сен-Венана. Для аппроксимации уравнений и расчетной области используются криволинейные сетки с узлами, разнесенными по граням элементарного пространственного бокса.

Движение отдельной льдины при моделировании ледохода отождествляется с движением ее центра масс, так что совокупность свободно плавающих ледяных обломков в формализованном представлении является системой материальных точек в пространстве. Толщина, линейный размер и площадь льдин предполагаются различными для разных элементов стохастического ансамбля и задаются случайным образом. Правая часть уравнения движения отдельного ледового элемента содержит сумму трех слагаемых, описывающих форсинг со стороны речного потока, эффекты попарных соударений и взаимодействия льдин с берегом и гидротехническими конструкциями. При описании явления торошения, возникающего в заторе по мере аккумуляции массы льда, вводится коэффициент торошения, величина которого зависит от статического напора и количественно выражает долю льда, потраченного на приращение толщины ледового покрова под влиянием продольных напряжений.

Анонсируемая модель ледохода апробирована на участке р. Лена в районе Якутска для локализации мест возможного заторообразования. Численные эксперименты показывают, что при небольшой плотности ледохода и отсутствии крупных элементов плавающий лед транзитом продвигается по руслу и покидает расчетный участок через выходной створ. С увеличением дисперсии выборки и размеров элементов становится возможной закупорка основного русла одной или несколькими крупными льдинами за счет заклинивания о берега. В этом случае образуется ледяная перемычка, перекрывающая русло и служащая очагом затора. Перемычка препятствует

свободному сплаву льда и обуславливает скопление льдин позади очага, что приводит к увеличению протяженности заторного поля со временем.

Расчетные результаты отражают вероятный сценарий развития ледохода и показывают возможности использования численной модели для изучения взаимодействия массивов колотого льда с гидротехническими объектами на акватории водоемов.

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ПОДО ЛЬДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

O.A. Шушаков^{1,2}, A.G. Маръясов¹, T.J. Nedwed³, L.J. Srnka³, H. Thomann⁴

¹ Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

³ ExxonMobil Upstream Research, Houston, TX USA

⁴ ExxonMobil Research & Engineering, Annandale, NJ USA

С началом разведки и добычи углеводородов в Арктике обнаружение аварийных разливов нефти подо льдом стало актуальной технической проблемой. Был сделан ряд попыток обнаружения нефти подо льдом акустическими методами, оптической и ультрафиолетовой накачкой и подповерхностной радиолокацией. Многие из этих методов имели некоторый успех, тем не менее, они не используются регулярно в поле. Предложенные к настоящему времени методы имеют ограниченную область применения и требуют прямого контакта с ледяной поверхностью. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) — это метод, используемый для характеризации молекулярной структуры жидкостей и твердых тел. ЯМР получается помещением образца в постоянное магнитное поле, чтобы выстроить магнитные моменты атомных ядер этим полем. Магнитные моменты затем возбуждаются одним или несколькими радиочастотными (РЧ) импульсами. Электромагнитная энергия, выделяемая при возвращении магнитных моментов к равновесию, регистрируется приемником. Характеристики РЧ отклика позволяют идентифицировать углеводороды. ЯМР использовался для характеризации подземных водоносных слоев, для каротажа скважин и анализа кернов коллекторских пород в нефтяной индустрии, а также для многих других аналитических применений в химии, материаловедении, физике и биологии. В случае применения для обнаружения нефтяных разливов, очень важным аспектом ЯМР является то, что сигналы ото льда и снега обычно не наблюдаются при экспериментальных условиях, используемых для обнаружения нефти или жидкой воды. Таким образом, присутствие снега или льда не создает интерференционных проблем, которые присущи другим методам обнаружения разливов нефти. Более того, сигналы ЯМР от нефти и воды могут быть разделены на основе присущей им разнице в ЯМР-отклике от этих типов жидкостей. Также, по аналогии с обнаружением воды под землей в водоносных горизонтах, этот метод может использовать магнитное поле Земли как статическое магнитное поле и поэтому возможно избежать сложности и дороговизны генерации независимого магнитного поля для дистанционного обнаружения флюидов под поверхностью. Исследование позволяет определить,

может ли располагаемый на поверхности прибор, используемый в настоящее время для характеристики подземных водоносных слоев, быть модифицирован и помещен на подвижную платформу. Цель исследования — разработать технологию, позволяющую дистанционно с помощью относительно недорогого оборудования обнаруживать нефть подо льдом в морских условиях или нефть под снегом на земле.

Работа выполнена при финансовой поддержке Американского фонда гражданских исследований и развития (код проекта RUG1-30007-NO-08).

Авторский указатель

- Nedwed Т.Ж., 64
Srnka L.J., 64
Thomann H., 64
Алексеев Г. В., 7
Альгинов Р. А., 60
Аннин Б. Д., 8
Апполонов Е. М., 9, 10
Аргунова К. К., 13
Ардюков Д.Г., 56
Архипов В. В., 41

Баранская А. В., 41
Бельмечев Н. Ф., 8
Беляшов В. А., 11
Бойко А.М., 11
Бойко Е.В., 56
Бойко М.Е., 11
Болдырева О. Ю., 22
Бондарев Э. А., 13
Бородин С. Л., 40

Ваганова Н. А., 13
Васильев А. А., 15
Васильев Н. К., 16
Вергун А. П., 41
Верещагин В. Ю., 29
Веселов В. А., 11

Гаврилов Н.В., 24
Герасимов А. И., 46
Глазырин В. П., 17, 18
Гольдштейн Р. В., 19, 20
Горельский В. А., 21
Гренкин Г. В., 7
Губайдуллин А. А., 22

Добродеев А. А., 9, 23
Доманский А. В., 35
Дудко Д. Н., 22

Епифанов В. П., 19, 23
Ерманюк Е.В., 24
Ершов А. П., 39

Земляк В. Л., 25
Зефиров С. В., 17
Иванов А. А., 16
Иванов А.М., 37
Иванова И. К., 26, 27
Иванова Т.И., 11

Каргаполов А. А., 30
Клементьева Н. Ю., 9, 28
Козин В. М., 25, 29
Кокин О. В., 41
Колесников Ю. И., 30
Коняев А. А., 21
Коробкин А. А., 31, 32, 45
Корсакова Н.К., 43
Костиков В. К., 31
Кочетков А. В., 17
Крылов С. В., 17
Кузьмин Г.П., 32
Курсков А.В., 11

Лабутин В. Н., 33
Левин Б. В., 35
Леган М. А., 36
Лукин Е. С., 37

Макаренко Н.И., 31
Марков В. С., 33
Марченко А. В., 40, 41
Марьясов А.Г., 64
Матвеев А. Д., 38
Медведев Д. А., 39
Морозов Е. Г., 40
Музылев С. В., 40
Мусакаев Н. Г., 40

Огородов С. А., 41
Орлов М.Ю., 17, 18
Орлов Ю. Н., 17
Орлова Ю. Н., 18
Осипенко Н. М., 20

Папин А. А., 43
Пеньковский В.И., 43

- Петров В.Н., 51
Петрова А.Г., 45
Петрова Н.Д., 37
Повереннов Е.Ю., 17
Попов С.Н., 46
- Рапута В.Ф., 47
Решетова Г.В., 48
Рожин И.И., 13
- Сазонов К.Е., 9–11, 23, 28
Сасорова Е.В., 35
Семенов М.Е., 50
Семенов Х.Н., 51
Сергеева А.М., 51
Смирнов В.Н., 53
Соловьев Н.Г., 23
Степанов И.В., 57
Стурова И.В., 54
- Тананаев Н.И., 55
Тимофеев А.В., 56
Тимофеев В.Ю., 56
Тимофеев О.Я., 9, 10, 57
Ткачева А.В., 51
Ткачева Л.А., 57
Токарева М.А., 43
Толкачев В.Ф., 21
- Федин К.В., 30
Филимонов М.Ю., 13
- Хабиров С.В., 59
Хайдуков В.Г., 48
Харламов С.Н., 60
Хлуднев А.М., 61
- Цвецинский А.С., 41
Цуприк В.Г., 62
- Чеверда В.А., 48
Чиркунов Ю.А., 8
- Шарков М.Д., 11
Шаталина И.Н., 16
Шиц Е.Ю., 26, 27, 50
Шишмарев К.А., 32
Шлычков В.А., 63
Шушаков О.А., 64

Подписано в печать 14.05.2012. Формат 60×84 1/16. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 4.0 Уч.-изд. л. 5. Тираж 100 экз. Заказ № 101.

Лицензия ПД N 12-0143 от 22.10.2001
Отпечатано на полиграфическом участке
Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, проспект акад. Лаврентьева, 15.