

На правах рукописи

Работа выполнена в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Комсомольском-на-Амуре государственном педагогическом университете»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор заслуженный деятель науки РФ
Одиноков Валерий Иванович.

СЕРГЕЕВА Анастасия Михайловна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Олейников Александр Иванович;

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ

кандидат физико-математических наук
Манцыбара Александр Анатольевич.

АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Ведущая организация: Дальневосточный государственный технический
университет, г. Владивосток.

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Защита состоится «23» ноября 2006 года в 12 часов 30 минут на заседании диссертационного совета ДМ 005.007.02 в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, аудитория 510.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и процессов управления ДВО РАН.



Автореферат разослан «19» октября 2006 года.

Владивосток - 2006

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н.



Дудко О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Продление навигации на внутренних водных путях является важной проблемой. Расширение освоения северных регионов России, их сырьевых и энергетических ресурсов, приводит к необходимости обеспечения передвижения судов в условиях ледяной корки и ледяного покрова толщиной от 1 метра и более. Сам факт полного разрушения льда еще не гарантирует безопасное продвижение судна, особенно если ледяные блоки по габаритам соизмеримы с его размерами. Проблема заключается не только в том, чтобы разрушить ледяной покров, но и в том, чтобы обеспечить максимально безопасное продвижение водного транспорта. Это подтверждается многочисленными патентами, предлагающими способы разрушения ледяного покрова. Существует множество экспериментальных исследований, связанных с разрушением льда. В данной работе рассматривается ледяной покров и процесс его разрушения под действием собственного веса и атмосферного давления. Исследуется способ разрушения ледяного покрова, заключающийся в том, что подо льдом создается вакуумное пространство необходимой площади, при котором лед будет разрушаться под действием собственного веса и атмосферного давления. Этот новый способ разрушения льда не только эффективен, но и прост в реализации. Таким образом, исследования, отраженные в диссертации, позволяют оценить возможность применения метода на различных толщинах льда и являются актуальными при рассмотрении разрушения льда с помощью ледокольных приставок.

Целью работы является построение математической модели и численной схемы, описывающей зарождение и развитие трещины в ледяном покрове под действием атмосферного давления и собственного веса.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- построена пространственная математическая модель разрушения ледяного покрова под действием собственного веса и атмосферного давления;
- проведен анализ влияния геометрии контейнера на разрушение льда при различных внешних воздействиях и способах его установки подо льдом;
- рассмотрен процесс развития трещины в ледяном покрове;
- получена формула зависимости длины контейнера от толщины ледяного покрова и внешних характеристик его привода.

Практическая ценность работы. Предложенный в работе метод и алгоритм позволяют создавать различные математические модели и решать пространственные задачи. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы в практических задачах по разработке новых способов разрушения льда с помощью ледокольных приставок. Программа,

разработанная для исследования распределения напряжений в ледяной пластине конечной толщины, может применяться для решения ряда пространственных задач, где требуется оценить поведение материала, находящегося под воздействием внешних нагрузок.

Достоверность полученных результатов основана на использовании фундаментальных уравнений механики деформируемого твердого тела и применении апробированного численного метода.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: II конференции «Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения» (Владивосток, 2003), 44 научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Вестник научного общества студентов и молодых ученых» (Комсомольск – на – Амуре, 2004), III конференции «Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения» (Владивосток – Комсомольск-на-Амуре, 2005), IV Всероссийском научном семинаре памяти профессора С.Д. Волкова «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2006), Всероссийской конференции, посвященной 70-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова «Фундаментальные и прикладные вопросы механики» (Владивосток, 2006), V всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2006), Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Новосибирск, 2006).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 166 страниц, включая 74 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 74 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 10 научных работах, в то числе получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнен обзор по существующим методам разрушения ледяного покрова, а также рассмотрены некоторые виды льдов и их специфические свойства; определена цель работы; обоснована актуальность темы; изложена структура работы; определены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию способа разрушения ледяного покрова под действием собственного веса и внешнего атмосферного давления, разработанного Одиноковым В.И. и Козиным В.М (патент РФ № 2220878), сделан расчет скорости заполнения контейнера водой.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая способ разрушения ледяного покрова. В носовой оконечности судна при помощи тяг (1) и привода (2) устанавливают ледокольную приставку (3) и создают в ледяном покрове свободную кромку (4). Ледокольная приставка (3) представляет собой устройство, состоящее из горизонтальной площадки (днище) (7), вертикальных пластин (боковые стенки) (5) и подвижных створок (6), способных при помощи привода (2) перемещаться со скоростью v .

Длина площадки (днища) (7) B_1 должна быть больше ширины судна B_2 , а высота вертикальных пластин (боковых стенок) (5) и створок (6) h не должна быть меньше толщины льда h_1 . При достижении створками крайнего положения (9) возникает безвоздушная полость (8). Две вертикальные пластины (боковые стенки) (5) и горизонтальная площадка (днище) (7) препятствуют активному заполнению контейнера водой при раздвижении подвижных створок (6). С торцевых внешних сторон (10) контейнер предельно открыт (имеется только привод перемещения створок (6)) и нет препятствий отжима воды подвижными створками (6). Скорость перемещения v подвижных створок (6) и глубина контейнера h должны быть такими, чтобы при раздвижении подвижных створок (6) до величины, при которой начнет разрушаться лед, контейнер наполнится водой через имеющиеся зазоры не более, чем на 2/3 своего объема.

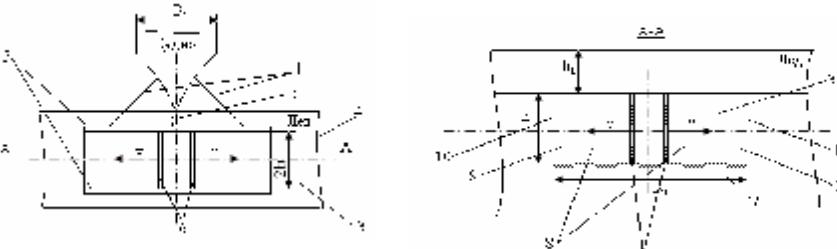


Рис.1. Схема, поясняющая способ разрушения ледяного покрова:

1 – тяги, 2 – привод, 3 – приставка, 4 – свободная кромка, 5 – вертикальные пластины (боковые стенки), 6 – подвижные створки, 7 – горизонтальная площадка (днище), 8 – безвоздушная полость, 9 – крайнее положение створок, 10 – торцевые внешние стороны контейнера.

Получена аналитическая формула для скорости раздвижения створок:

$$v = \frac{3M}{2 \cdot b \cdot h}, \quad (1)$$

$$M = d \cdot \sqrt{\frac{2s_0 \cdot q}{g}} (b + x) + \frac{4}{3} \cdot d \cdot \sqrt{2q} \cdot \left[\left(\frac{s_0}{g} + h \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{s_0}{g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + d \cdot b \cdot \sqrt{2q \left(\frac{s_0}{g} + h \right)} .$$

Здесь x – текущая величина расхождения створок в вертикальной плоскости симметрии; d – величина зазора между подвижными створками и

неподвижными частями контейнера, а также ледяной пластины; q – ускорение свободного падения; g – удельный вес воды; s_0 – атмосферное давление; b – половина ширины контейнера.

Достоинством способа является его высокая эффективность за счет использования ледокольной приставки, позволяющей образовывать подо льдом безвоздушную полость, в которую под действием собственного веса и атмосферного давления проламываются куски от сплошного льда, образуя судоходный канал. Также необходимо отметить, что разрушение ледяного покрова этим способом не требует больших энергозатрат, в отличие от известных способов разрушения льда с помощью ледокольных приставок разработкой которых занимались И.Л. Рабей, В.А. Зуев, В.М. Козин – в России; С. Вагнер, «Роберт Меллинг Стефенс», «Кэндиден марин дриллинг лимитед» – в США; «Кэндиден дриллинг лимитед» – в Канаде.

Во второй главе строится математическая модель, в основу которой положен численный метод, предложенный В.И. Одноковым. Приведено обоснование выбора данного метода, который дает при достаточно малом числе элементов возможность найти поля напряжений и приращений перемещений, а также разработать пакет программ для ЭВМ.

Используя уравнения теории упругости для малых деформаций, запишем систему дифференциальных уравнений в Эйлеровой системе координат:

$$s_{ij,j} + F_i = 0 \quad ; \quad (i, j = 1, 2, 3); \quad F_2 = F_3 = 0; \quad (2)$$

$$s_{ij} - s d_{ij} = 2G e_{ij}^*; \quad e_{ij}^* = e_{ij} - \frac{1}{3} e; \quad e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \quad e = e_{ii}; \quad s = \frac{1}{3} s_{ii}; \quad (3)$$

$$e_{ii} = 3k s. \quad (4)$$

Здесь G – модуль сдвига, $G = G(q)$; q – температура; k – коэффициент объемного сжатия, $k = k(q)$; $[s_{ij}]$ – тензор напряжения; $[e_{ij}]$ – тензор деформации; F_i – проекция удельной объемной силы по осям x_i ; u_i – проекции перемещений по координатным осям x_i , $i = 1, 2, 3$.

Уравнение теплопроводности для стационарного процесса ($q = 0$)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(I \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) = 0, \quad (5)$$

где I – коэффициент теплопроводности.

Уравнения (2 – 5) записаны с учетом суммирования по повторяющимся индексам.

Ледяной покров можно рассматривать как пластину конечной толщины, в которой $\frac{\partial q}{\partial x_2} = \frac{\partial q}{\partial x_3} = 0$; $q = q_0$ при $x_1 = 0$; $q = q_1$ при $x_1 = h$. Тогда, решая

уравнение (5), с учетом, что $I = I_0(1+aq)$ и $q_0 = 0$, для температуры θ получим:

$$q = -\frac{1}{a} + \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{x_1}{h} \left(\frac{2q_1}{a} + q_1^2 \right)} \quad , \quad (6)$$

где $a = -0,0159$ (1°C), $I_0 = 2,22 \text{ Вт/(м·К)}$.

Границные условия задачи имеют вид

$$\begin{aligned} s_{11}|_{S_8} &= -s_0; (s_{11} = s_{12} = s_{13})|_{S_1} = 0; s_{11}|_{S_2} = s^*; (s_{12} = s_{13})|_{S_i} = 0, i=2, 3, 8; \\ (s_{21} = s_{23})|_{S_4} &= 0; s_{23}|_{S_6} = 0; (s_{31} = s_{32})|_{S_5} = 0; s_{32}|_{S_7} = 0; u_2|_{S_i} = 0, i=4, 6; \\ s_{11}|_{S_3} &= -(h_0 g + q_1); u_3|_{S_i} = 0, i=5, 7, \end{aligned}$$

где $s_0 = 10^4 \text{ кг/м}^2$ – напряжение, создаваемое атмосферным давлением; $q_1 = s_0 + gh_*$, h_* – глубина погружения льда. Величина зазора в формуле (1) $\delta = 0,01 \text{ м}$.

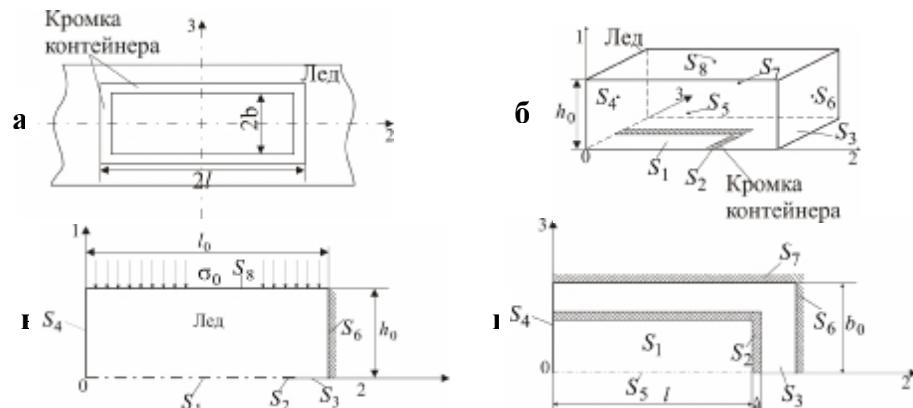


Рис. 2. Схема расположения контейнера и ледяного покрова:
а – контейнер (вид сверху), б – 1/4 часть контейнера, над которым находится лед (вид сбоку), в – 1/4 часть льда, находящегося над контейнером (вид сбоку), г – расположение контейнера и ледяного покрова (вид сверху).

Так как контейнер, наполненный водой, имеет положительную плавучесть, то при раздвижении створок появляется сила, направленная снизу на лед от бортов контейнера. Эта сила появляется от действия атмосферного давления и вытесненной воды, вследствие образовавшейся в контейнере полости. Тогда выталкивающая сила равна $P = b \cdot l \cdot h_1 \cdot g$, где h_1 – высота образовавшейся в контейнере полости ($h_1 < h$, так как в процессе раздвижения щек внутрь затекает вода). Следовательно, напряжение на бортах контейнера

S_2 (см. рис. 2) равно $s^* = -P/[(l+D) \cdot D + b \cdot D] = s_{11}|_{S_2}$. Таким образом, в процессе раздвижения щек подо льдом создается безвоздушное пространство, и лед начинает под действием собственного веса и внешнего атмосферного давления, деформируясь, погружаться вместе с контейнером в воду. На внешних гранях S_6 , S_7 (рис. 2) принимается условие закрепления льда, не дающее ему перемещаться в воде. Этим самым имитируется связь рассматриваемой ледовой подушки с внешней недеформируемой основой. Данная связь определяется уравнениями

$s_{21}|_{S_6} = -y_6 t_s \frac{v_{ck}}{|v|}$; $s_{31}|_{S_7} = -y_7 t_s \frac{v_{ck}}{|v|}$, где y_6, y_7 – коэффициенты ($y_6 = y_7 = 1000$); v_{ck} – скорость скольжения ледяной подушки относительно основы; $v_{ck} = v_1|_{S_3} - v_1^*$, v_1^* – скорость перемещения основы. В нашем случае $v_1^* = 0$; $|v|$ – нормирующая скорость; t_s – условный предел текучести льда. Как показали расчеты, при принятых значениях y_i ($i = 6, 7$), значения перемещения u_1 вблизи S_6 , S_7 составило 0,0007 мм. При этом касательные напряжения на поверхностях S_6 , S_7 не превышали 0,02 МПа.

Для численного решения уравнений (2,3,4) воспользуемся формулами, полученными Одиноковым В.И. для элемента в произвольной ортогональной системе координат:

$$e_{ii} = \frac{2Du_i}{S_{ji}} + \frac{2u_j}{S_{ji}} \frac{DS_{ji}}{S_{ij}} + \frac{2u_k}{S_{ki}} \frac{DS_{ki}}{S_{ik}} \quad , \quad (7)$$

$$e_{ij}^0 = \frac{2Du_j}{S_i} - \frac{\bar{u}_j}{2} \frac{(S_j^+ - S_j^-)}{S_i S_j} + \frac{2\bar{Du}_i}{S_j} - \frac{\bar{u}_i}{2} \frac{(S_i^+ - S_i^-)}{S_i S_j} \quad , \quad (8)$$

$$S_{ik} DS_{ij} (s_{ii} - s_{jj}) + S_{ij} DS_{ik} (s_{ii} - s_{kk}) + \frac{1}{2} DS_{ii} S_{ij} S_{ik} + \frac{1}{2} DS_{ik} S_{ki} S_{kj} + \quad (9)$$

$$+ \frac{1}{2} DS_{ij} S_{ji} S_{jk} + S_{ij} (S_{ji} DS_{jk} + 2S_{jk} DS_{ji}) + S_{ik} (S_{ki} DS_{kj} + 2S_{kj} DS_{ki}) + F_i = 0,$$

где ($i, j, k = 1, 2, 3$; $i^1 j^1 k$); $S_{ij} = S_{ij}^1 + S_{ij}^2$; $DS_{ij} = S_{ij}^2 - S_{ij}^1$; $S_i^- = S_i^{1-} + S_i^{2-}$;

$$u_i = u_i^1 + u_i^2; Du_i = u_i^2 - u_i^1; S_i = S_i^1 + S_i^2; \bar{Du}_i = \bar{u}_i^2 - \bar{u}_i^1; S_i^+ = S_i^{1+} + S_i^{2+}.$$

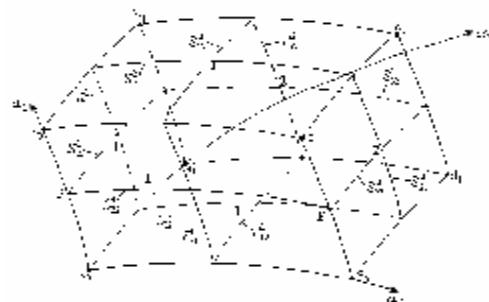


Рис. 3. Элементарный элемент, геометрия которого описывается системой ортогональных координат



Рис. 4. Схема распределения перемещений по ребрам элементарного элемента в ортогональной системе координат

Выразим u_1^2 из уравнения (4) с учетом формул (7):

$$u_1^2 = \frac{u_1^1(1-t_6-t_8)-(u_2^1+u_2^2)\cdot t_1-(u_3^1+u_3^2)\cdot t_2-(u_2^2-u_2^1)\cdot t_3+(u_3^1+u_3^2)\cdot t_4 t_5}{1+t_6+t_8} + \frac{(u_3^2-u_3^1)\cdot t_7}{1+t_6+t_8} - \frac{(u_2^1+u_2^2)\cdot t_9 t_{10}}{1+t_6+t_8} + \frac{3kSS_{21}}{2(1+t_6+t_8)}. \quad (10)$$

$$\text{Здесь } t_1 = \frac{DS_{21}}{S_{12}}; \quad t_2 = \frac{DS_{31}}{S_{13}}; \quad t_3 = \frac{S_{21}}{S_{32}}; \quad t_4 = \frac{DS_{12}}{S_{32}}; \quad t_6 = \frac{S_{21}}{S_{13}}; \\ t_7 = \frac{DS_{13}}{S_{13}}; \quad t_9 = \frac{S_{21}}{S_{32}}; \quad t_{10} = \frac{DS_{23}}{S_{23}}.$$

Так как, в нашем случае задача решается в прямоугольной системе координат, то есть $t_1=t_2=t_4=t_6=t_8=t_{10}=0$, то уравнение (10) примет вид

$$u_1^2 = u_1^1 - (u_2^2 - u_2^1) \cdot t_3 - (u_3^2 - u_3^1) \cdot t_7 + \frac{3kSS_{21}}{2}. \quad (11)$$

Выражение (11) будем считать рекуррентным соотношением, определяющим u_1 по всем элементам исследуемой области от $a_1=0$ до $a_1=a_1^*$. При этом u_2^t , u_3^t ($t=1,2$) являются независимыми переменными. Пусть $\Gamma_i|_{a_i=0}$, $\Gamma_i^*|_{a_i=a_i^*}$ ($i=1,2,3$) – поверхности, ограничивающие рассматриваемую область. При этом Γ_{iu} , Γ_{iu}^* – поверхности, на которых граничные условия заданы в перемещениях; Γ_{is} , Γ_{is}^* – поверхности, где

граничные условия заданы в напряжениях. При этом $\Gamma_i = \Gamma_{iu} + \Gamma_{is}$, $\Gamma_i^* = \Gamma_{iu}^* + \Gamma_{is}^*$. В этом случае множество $\{u_1^1\}_{\Gamma_{is}}$ является множеством независимых переменных. На поверхности Γ_{iu}^* реализуются новые уравнения

$$F_1^i = \left. \left(u_1^2 \right) \right|_{\Gamma_{iu}^*} - \left. \left(u_1^* \right) \right|_{\Gamma_{iu}^*} = 0. \quad (12)$$

Здесь $\left. \left(u_1^* \right) \right|_{\Gamma_{iu}^*}$ – перемещения u_1 , заданные граничными условиями на поверхности Γ_{iu}^* . Число уравнений (12) в точности соответствует числу неизвестных параметров $S_{11}|_{\Gamma_{iu}^*}$. Из уравнений (9) с учетом уравнений (3) и $S_{ik} = S_{jk}$, выразим S_{ii}^1 :

$$S_{ii}^1 = S_{ii}^2 + \frac{4G(e_{ii} - e_{jj}) \cdot DS_{ij}}{S_{ij}} + \frac{4G(e_{ii} - e_{kk}) \cdot DS_{ik}}{S_{ik}} + \frac{DS_{ik}S_{ki}}{S_{ik}} + \frac{DS_{ij}S_{ji}}{S_{ij}} + \frac{2S_{ij}(S_{ji} \cdot DS_{jk} + 2S_{jk} \cdot DS_{ji})}{S_{ij}S_{ik}} + \frac{2S_{ik}(S_{ki} \cdot DS_{kj} + 2S_{kj} \cdot DS_{ki})}{S_{ij}S_{ik}} + \frac{2F_i}{S_{ij}S_{ik}}, \quad (13)$$

где $(i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k)$, F_i – проекция удельной объемной силы по осям x_i .

Учитывая, что задача решается в прямоугольной системе координат и $\Delta S_{ij} = 0$ ($i, j=1, 2, 3; i \neq j$), упростим (13):

$$S_{ii}^1 = S_{ii}^2 + \frac{\Delta S_{ik}S_{ki}}{S_{ik}} + \frac{\Delta S_{ij}S_{ji}}{S_{ij}} + \frac{2F_i}{S_{ij}S_{ik}}, \quad (14)$$

где $(i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k)$.

Данные рекуррентные соотношения будем удовлетворять от $a_i = a_i^*$ до $a_i = 0$. При этом на поверхностях Γ_{is} будут иметь место уравнения

$$F_2^i = \left. \left(S_{ii}^1 \right) \right|_{\Gamma_{is}} - \left. \left(S_{ii}^* \right) \right|_{\Gamma_{is}} = 0, \quad (15)$$

где $\left. \left(S_{ii}^* \right) \right|_{\Gamma_{is}}$ – нормальные напряжения S_{ii} , заданные на поверхности Γ_{is} граничными условиями. Число уравнений (14) равно числу неизвестных $\left. \left(u_i \right) \right|_{\Gamma_{is}}$. Следующую группу уравнений образуем из уравнений состояний

$$F_3^i = S_{11} - S_{22} - 2G(e_{11} - e_{22}) = 0 \quad F_4^i = S_{11} - S_{33} - 2G(e_{11} - e_{33}) = 0. \quad (16)$$

Этих уравнений, записанных по каждому элементу области, будет ровно столько, сколько неизвестных перемещений u_2 , u_3 по внутренним граням элементов и неизвестных $u_2|_{\Gamma_{2s}^*}$, $u_3|_{\Gamma_{3s}^*}$, $s_{22}|_{\Gamma_{2u}^*}$, $s_{33}|_{\Gamma_{3u}^*}$.

Следующая группа уравнений по каждому элементу «п» будет

$$F_5^i = (s)_n - \frac{1}{3}(s_{11} + s_{22} + s_{33})_n = 0. \quad (17)$$

Таким образом, имеем множество независимых переменных

$$X \{ [s_{11}|_{\Gamma_{1u}^*}], [u_i|_{\Gamma_{is}}], i = 1, 2, 3, [u_i], i = 2, 3, [u_i|_{\Gamma_{is}^*}], i = 2, 3, [s_{ii}|_{\Gamma_{1u}^*}], i = 2, 3, s_n \}$$

Коэффициенты и свободные члены новой эквивалентной системы линейных уравнений определяются численным методом. Пусть эквивалентная система уравнений имеет вид: $F_i = a_{ij}x_j + b_i = 0$; $i, j = 1, \dots, n$. Если положить все неизвестные равными нулю $x_i = 0$, $i = 1, \dots, n$, то насчитываются свободные члены новой системы: $F_i^0 = b_i$; $i = 1, \dots, n$. Далее находим коэффициенты a_{ij} . Для этого положим $x_k = 1$, $x_i = 0$, $i \neq k$, $i = 1, \dots, n$, находим F_i^k . $a_{ik} = (F_i^k - F_i^0)/1$; $i = 1, \dots, n$. Таким образом определяется вся матрица a_{ij} новой эквивалентной системы.

Алгоритм решения задачи

1. Исследуемая область деформирования разбивается на элементы ортогональной формы (в нашем случае на элементы прямоугольной формы). Рассчитывается матрица дуг элементов.
2. Задаются граничные условия.
3. По формуле (6) вычисляется поле температур по каждому элементу.
4. Вычисляются значения $(G)_n$ и $(k)_n$ по каждому элементу (n – номер элемента) по экспериментальным данным.
5. Рассчитывается матрица коэффициентов и свободных членов новой эквивалентной системы в соответствии с выше изложенной последовательностью вычислений.
6. Решается система линейных уравнений по стандартной программе.
7. По каждому элементу (его граням) вычисляются s_{ij} , u_i ($i, j = 1, 2, 3$).
8. Уточняются граничные условия по поверхности S_2 .
9. Если граничные условия на поверхности S_2 не выполняются, то следует их переназначение и осуществляется операция 5. Так, например, если на грани элемента, принадлежащего поверхности S_2 , было задано граничное

условие $u_1|_{S_2} = 0$, а в результате численного решения оказалось, что на грани этого элемента $s_{11}|_{S_2} > 0$, то следует автоматическое переназначение граничного условия, а именно $s_{11}|_{S_2} = 0$. Теперь из решения задачи на этой грани элемента будет отыскиваться $u_1|_{S_2}$. В случае выполнения граничных условий после решения системы следует операция 10.

10. Окончание расчета.

В третьей главе исследуются процессы разрушения льда:

- в стационарном контейнере на воздушной подушке;
- под действием гидростатического давления на стационарном контейнере;
- под действием гидростатического атмосферного давления на подведенном плавающем контейнере;
- под действием гидростатического атмосферного давления на подведенном плавающем контейнере с учетом его заполнения водой.

Подробно рассмотрены результаты решения задач. Выявлено, что данным способом возможно разрушение ледяного покрова до 3 метров, при этом размеры контейнера по ширине и длине превышают толщину льда почти в 7 раз. При меньших размерах контейнера разрушение ледяного покрова весьма затруднено. Чтобы разрушать лед подобным способом, потребуется контейнер очень больших размеров. Из рис. 5 видно, что ледяной покров прогибается в области полости контейнера, причем перемещение по вертикальной оси симметрии будет меняться от 3,5 до 4,5 мм в сторону, противоположную направлению этой оси.

В четвертой главе проводится анализ эволюции развития трещин в ледяном покрове. По литературным данным (Богородский В.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А. Разрушение льда. Методы, технические средства. Л.:Гидрометеоиздат, 1983) за критерий прочности принято растягивающее напряжение 1 МПа. Предлагается алгоритм решения задачи по распространению трещин во льду.

Установлено, что при критерии разрушения $s_{ii} \geq s_{np} = 1 \text{ МПа}$ (где $i = 2, 3$) появляющаяся в толще льда трещина вероятнее всего залечится из-за своих небольших размеров (ширина трещины не превышает 1мм). При этом ледяной покров переходит в новое устойчивое состояние и рост трещины прекращается. На рис.6 изображена конфигурация образовавшейся трещины в ледяном покрове. В работе получены параметры трещины при различных геометрических параметрах контейнера и различной толщины льда.

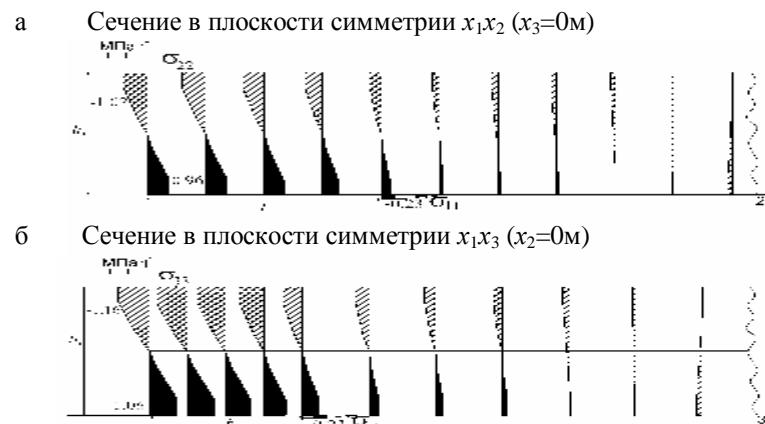


Рис. 5. Результаты расчета разрушения льда на подведенном плавающем контейнере с учетом заполнения водой при $b=2,30\text{м}$, $l=4\text{м}$, $b_0=12,30\text{м}$, $l_0=14\text{м}$, $\Delta=1\text{м}$, $h_0=1,5\text{м}$, $h=1,55\text{ м}$, $v=0,5\text{ м/с}$.

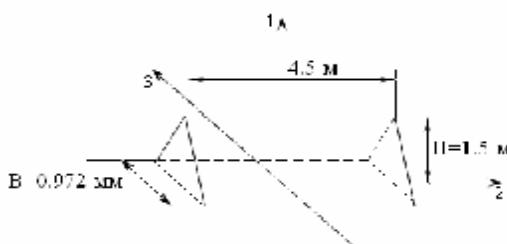


Рис. 6. Конфигурация трещины в ледяном покрове толщиной 3 метра:
В – ширина трещины, Н – высота трещины.

Расчеты показывают, что с уменьшением толщины льда трещина увеличивается в длину относительно контейнера в плоскости x_1x_2 и уменьшается по ширине, высота начального разрушения при этом не меняется – остается равной половине толщины льда.

Проведя ряд вычислений, было установлено, что ширину контейнера $2b$ (рис.1) необходимо увеличивать до тех пор, пока не начнется интенсивный процесс развития трещин, который закончится полным разрушением льда.

Получена формула (18), позволяющая найти зависимость величины максимального расхождения створок контейнера от заданных геометрических параметров его поперечного сечения и заданной величины растягивающего напряжения, при котором начнется разрушение льда:

$$l = 6.1419 \cdot h_0 \cdot e^{-1.7045h_0/b} \cdot e^{0.4219 \cdot (\frac{v}{v_x})} \cdot \left(\frac{s}{s_x}\right)^{0.5 \ln(h/h_x)}, \quad (18)$$

где l – половина длины контейнера (м); b – половина ширины контейнера (м); h – глубина контейнера (м); h_0 – толщина льда (м); v – скорость раздвижения створок (м/с); s – принятый критерий прочности льда (МПа); v_x – нормирующая скорость (1м/с); s_x – нормирующее напряжение (1МПа). Причем $h \geq 0,5h_0$; $b \geq 3h_0$; $v \geq 0,16\text{ м/с}$.

Коэффициенты формулы получены методом наименьших квадратов по результатам теоретических расчетов.

Формула (18) позволяет найти необходимые параметры контейнера и оценить возможность разрушения льда определенной толщины.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана численная схема решения пространственной задачи по определению напряжений и перемещений при нагружении ледяного покрова внешней нагрузкой и массовой силой.
2. Построена пространственная математическая модель разрушения ледяного покрова под действием собственного веса и атмосферного давления.
3. Составлены блоки программы на языке Visual Fortran 6.1, которые дают возможность определять напряжения и перемещения при решении пространственной задачи.
4. Решены задачи о разрушении льда в стационарном контейнере на воздушной подушке, под действием гидростатического атмосферного давления на стационарном контейнере, под действием гидростатического атмосферного давления на подведенном плавающем контейнере, под действием гидростатического атмосферного давления на подведенном плавающем контейнере с учетом его заполнения водой.
5. Рассмотрен процесс развития трещины в ледяном покрове.
6. Получена формула устойчивого разрушения льда в зависимости от длины контейнера, толщины ледяного покрова и внешних характеристик его привода.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Одиноков В.И., Сергеева А.М. Математическое моделирование одного нового процесса разрушения ледяного покрова // Прикладная механика и теоретическая физика. 2006. №2. С.139-146.
2. Одиноков В.И., Сергеева А.М. Моделирование процесса разрушения ледяного покрова в стационарном контейнере на воздушной подушке // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии

- машиностроения: Сборник докладов третьей конференции. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН. 2005. С. 84-97.
3. Сергеева А.М. Разрушение льда атмосферным давлением // Вестник ГОУВПО КнАГПУ. 2004. С. 93-96.
 4. Полярус (Сергеева) А.М., Романов Д.Ю. Об одном способе разрушения ледяного покрова // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения: Сборник докладов второй конференции. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН. 2003. С. 23-28.
 5. Романов Д.Ю., Полярус (Сергеева) А.М. Разрушение ледяного покрова от сжимающих усилий катамарана и поперечной нагрузки // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения: Сборник докладов второй конференции. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН. 2003. С. 29-31.
 6. Odinokov V.I., Sergeeva. A.M. Mathematical Modeling for One New Method of Breaking Ice Cover // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. Springer New York. Volume 47. №2. 2006. pp.266-273.
 7. Сергеева А.М. Математическое моделирование процесса разрушения ледяного покрова под действием внешнего атмосферного давления и собственного веса // Фундаментальные и прикладные вопросы механики: Материалы всероссийской конференции, посвященной 70-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. 2006. С.98-99.
 8. Сергеева А.М. Моделирование процесса развития трещин в ледяном покрове // Фундаментальные и прикладные вопросы механики: Материалы всероссийской конференции, посвященной 70-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. 2006. С.100-101.
 9. Сергеева А.М. Математическое моделирование процесса разрушения ледяного покрова под действием гидростатического атмосферного давления.// Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: Тезисы докладов всероссийской конференции. Новосибирск: НГТУ, 2006. С.113.
 10. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610010. Математическое моделирование процесса разрушения ледяного покрова / Одиноков В.И., Сергеева А.М., Жигалкин К.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2006.

Личный вклад автора

Работы [3], [7-9] выполнены автором лично. В работах [1], [2], [4-6], [10] автор самостоятельно разработал численную схему, программу и осуществил анализ полученных численных расчетов.

Сергеева Анастасия Михайловна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Автореферат

Подписано в печать 15 октября 2006 г.
Формат 60*84/16.

Усл. п. л. 0,8
Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 0,7
Заказ 002.

Издано в ИМиМ ДВО РАН. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1
Отпечатано участком оперативной печати ИМиМ ДВО РАН.
Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1