

УДК 539.3

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЦЕССА НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

В. И. Одинокоев, А. М. Сергеева

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005 Комсомольск-на-Амуре
E-mail: sergeeva@imim.ru

С использованием теории малых упругих деформаций и апробированного численного метода решается пространственная задача о напряженно-деформированном состоянии ледяной пластины конечной толщины при ее разрушении запатентованным методом.

Ключевые слова: разрушение ледяного покрова, напряжения, деформации.

Введение. Разработке новых способов разрушения льда в последнее время уделяется большое внимание. В данной работе исследуется напряженное состояние, деформирование и разрушение ледяного покрова новым запатентованным методом. Установлено, что растягивающие и сжимающие напряжения могут значительно превышать предел прочности льда, однако при этом полного разрушения ледяного покрова не происходит, возможно только нарушение его сплошности.

Рассматриваемый метод разрушения описан в работе [1], поэтому изложим только его суть. Под лед заводится контейнер с двумя подвижными створками (щеками) в центре, изначально находящимися в сомкнутом состоянии. Боковые стенки и днище контейнера являются сплошными и препятствуют быстрому заполнению его водой. При раздвижении створок в образовавшуюся полость поступает вода, однако область с пониженным давлением лишь частично заполняется жидкостью [2]. Вследствие этого подо льдом возникает область разрежения определенных геометрических размеров и под действием атмосферного давления и собственного веса лед начинает деформироваться и разрушаться. В [1] построена пространственная математическая модель разрушения ледяного покрова с использованием исследуемого метода. Установлено, что распределение напряжения в ледяном покрове зависит от геометрических параметров установки и скорости раздвижения створок, определен характер этой зависимости. В расчетах параметры установки подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие, принятое в качестве критерия разрушения: растягивающие и сжимающие напряжения должны превышать предел прочности льда (при этом полагается, что ледяной покров разрушается полностью). Для проведения анализа напряженного состояния льда разработан алгоритм. Позднее было установлено, что полного разрушения ледяного покрова может не происходить, возможно лишь незначительное нарушение сплошности, при котором лед выдерживает воздействие, оказываемое на него атмосферным давлением и собственным весом. Начальная ширина области разрушения B не превышает 1 мм, поэтому возможно восстановление сплошности.

В данной работе определены параметры установки, при которых ледяной покров полностью разрушается. Исследования проводились с использованием пространственной математической модели [1], однако алгоритм проведения расчетов изменен.

Постановка и решение задачи. Решается пространственная задача о деформации ледяного покрова под действием атмосферного давления и собственного веса льда (см. [1]). Поскольку задача симметричная, как и в работе [1], рассмотрим 1/4 области деформирования. При решении задачи используем численную схему [1] и в соответствии с работой [3] примем модуль Юнга $E = (87,6 - 0,21\theta - 0,0017\theta^2) \cdot 10^2$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,5 + 0,003\theta$ ($\theta > -40$ °С), коэффициент объемного сжатия $k = (1 - 2\nu)/E$, модуль сдвига $G = E/[2(1 + \nu)]$, температура окружающей среды $\theta_1 = -30$ °С.

В отличие от работы [1], где в качестве критерия разрушения принимались растягивающие и сжимающие напряжения, превышающие предел прочности льда, в данной работе полагается, что напряжение, превышающее предел прочности, приводит лишь к частичному нарушению сплошности льда. Для проведения вычислений с учетом нового условия разрушения алгоритм, предложенный в работе [1], несколько меняется и имеет следующий вид.

1. Исследуемая область деформирования разбивается на элементы ортогональной формы (в рассматриваемом случае — на элементы прямоугольной формы). Рассчитывается матрица дуг элементов.
2. Задаются граничные условия.
3. Рассчитывается поле температур в каждом элементе.
4. Рассчитываются значения G_n и k_n в каждом элементе (n — номер элемента).
5. В соответствии с изложенной выше последовательностью вычислений рассчитывается матрица коэффициентов и свободных членов новой эквивалентной системы.
6. По стандартной программе решается система линейных уравнений.
7. В каждом элементе (на его гранях) (ij) рассчитываются значения σ_{ij} , u_i ($i, j = 1, 2, 3$).
8. Определяются растягивающие напряжения σ_{ii} ($i = 2, 3$), значение которых превышает 1 МПа, и сжимающие напряжения, значение которых по модулю превышает 3 МПа (поскольку полагается, что в данном месте происходит нарушение сплошности ледяного покрова). Далее следует изменение граничных условий: на грани элемента, в котором выполняется критерий разрушения, полагается, что $\sigma_{ii} = 0$, и осуществляется операция 5. В случае выполнения условий по прочности следует окончание расчета.

Результаты исследования. Для того чтобы перейти к оценке полученных результатов, необходимо выбрать значения напряжений, которые примем в качестве критериев разрушения. Поскольку прочность морского льда на сжатие меняется в диапазоне $2 \div 3$ МПа, прочность на растяжение — в диапазоне $0,5 \div 1,0$ МПа [4], в качестве критериев разрушения выберем максимальные значения.

Рассматриваемые результаты получены при скорости раздвижения щек $v = 0,5$ м/с, которая согласно аналитической формуле [4] является оптимальной.

Раздвижение створок контейнера приводит к провисанию ледяного покрова в образующуюся область разрежения. Над полостью с пониженным давлением лед начинает разрушаться по растягивающим напряжениям, однако развитие нарушения сплошности не приводит к полному разрушению льда. На рис. 1 показана эволюция начального разрушения ледяного покрова различной толщины по мере раздвижения створок. Процесс образования и распространения нарушения сплошности (по растягивающим напряжениям σ_{33}) происходит последовательно в областях, обозначенных на рис. 1 цифрами 1–5. Как следует из табл. 1, образующаяся в ледяном покрове область начального разрушения мала (ее ширина $B \leq 1$ мм), поэтому возможно восстановление целостности льда.

Раздвигать створки имеет смысл до тех пор, пока в результате развития нарушения сплошности контейнер не начнет интенсивно “тонуть”. Однако существует такое рассто-

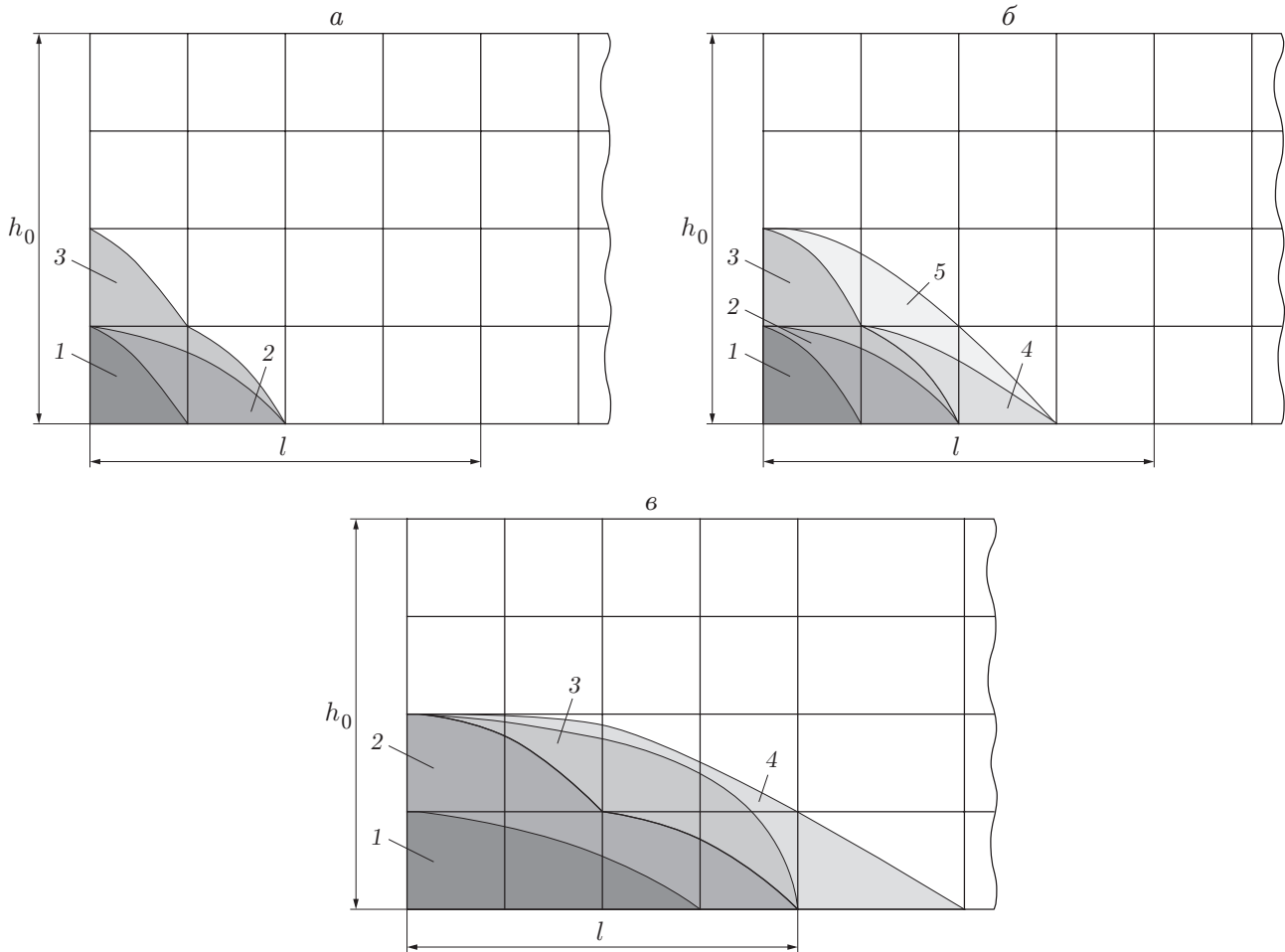


Рис. 1. Эволюция нарушения сплошности ледяного покрова различной толщины: a — $h_0 = 3$ м, $l = 9$ м; $б$ — $h_0 = 2$ м, $l = 5,5$ м; $в$ — $h_0 = 1$ м, $l = 2,3$ м; 1–5 — области нарушения сплошности в порядке их возникновения

яние между створками (будем называть его номинальной длиной контейнера), при превышении которого происходит “затопление” контейнера. На рис. 1 видно, что независимо от толщины ледяного покрова h_0 при заданной ширине контейнера $2b$ область разрушения растет вверх только до размера, равного $h_0/2$, и с увеличением длины контейнера $2l$ до номинальной больше не меняется. В табл. 1 показана зависимость геометрических размеров образовавшейся области нарушения сплошности от толщины ледяного покрова и параметров контейнера.

Из расчетов следует, что принятая для каждой толщины ледяного покрова ширина контейнера $2b$ недостаточна для полного разрушения льда. Для того чтобы процесс разрушения продолжался, необходимо увеличивать ширину контейнера. Увеличение ширины контейнера в свою очередь повлечет за собой увеличение номинальной длины. В табл. 2 приведены параметры контейнера, при которых происходит полное разрушение льда.

Рассмотрим подробно развитие нарушения сплошности до полного разрушения ледяного покрова (рис. 2). На рис. 2 видно, что разрушение льда происходит поэтапно в областях, обозначенных цифрами 1–4.

Этап 1. Ледяной покров начинает разрушаться по растягивающим напряжениям σ_{33} в плоскости симметрии $x_3 = 0$, а также сверху на периферии в плоскости x_1x_2 . В цен-

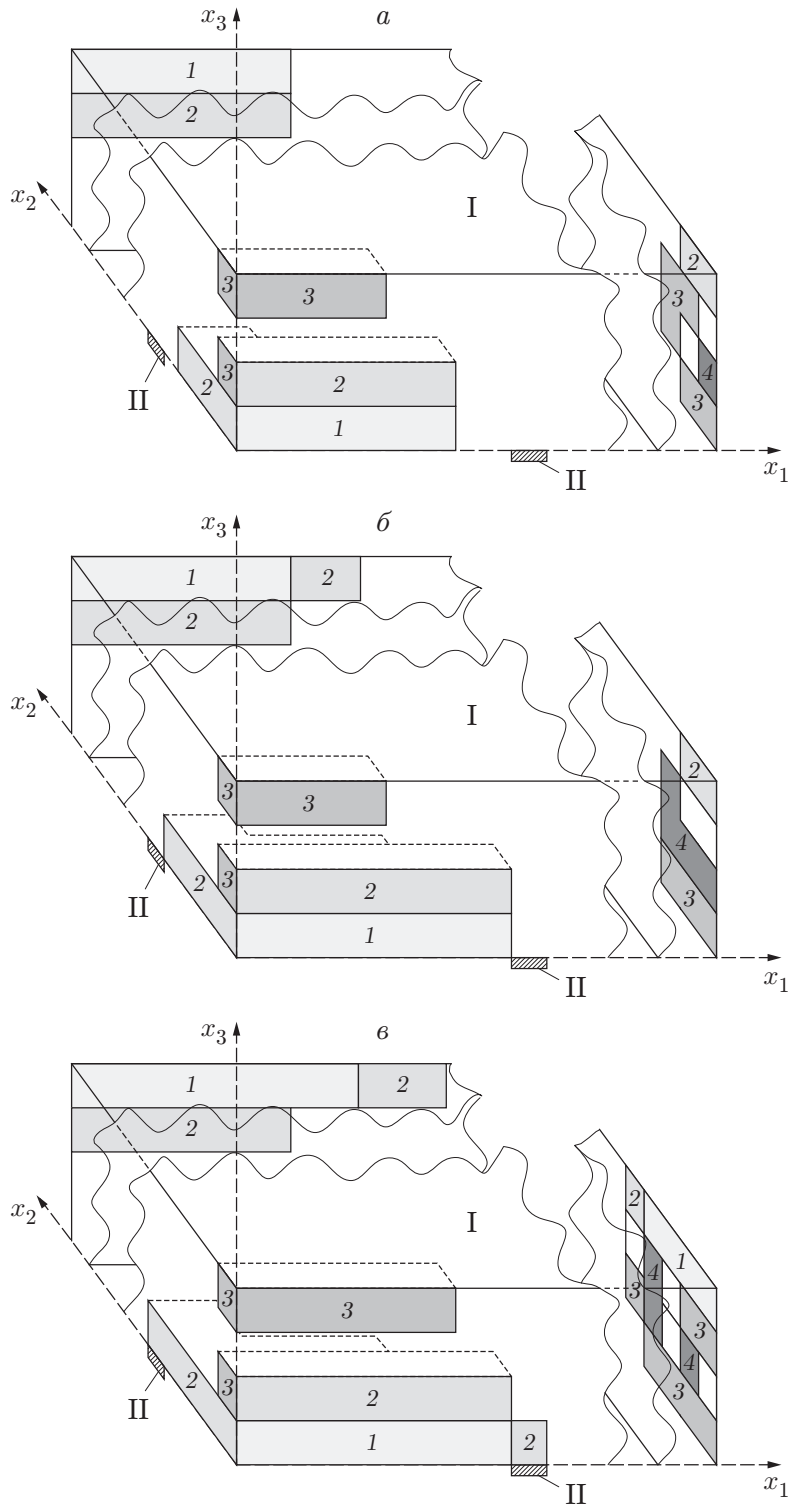


Рис. 2. Эволюция полного разрушения ледяного покрова различной толщины: a — $h_0 = 3$ м, $l = 22$ м; $б$ — $h_0 = 2$ м, $l = 11,7$ м; $в$ — $h_0 = 1$ м, $l = 4,4$ м; I — лед, II — кромка контейнера; 1–4 — области разрушения

Таблица 1

Размеры полости, образовавшейся в ледяном покрове,
при различных толщине льда и параметрах контейнера

h_0 , м	$2l$, м	$2b$, м	h , м	P , кН	B , мм	L , м	H , м
3,0	18,0	10,8	1,35	729,0	0,972	9,00	1,50
2,5	14,0	9,2	1,60	704,0	0,928	10,50	1,25
2,0	11,0	6,9	1,40	483,0	0,850	8,25	1,00
1,5	8,0	5,0	1,50	365,5	0,718	8,00	0,75
1,0	4,6	3,0	3,31	496,5	0,570	6,60	0,50

Примечание. h_0 — толщина ледяного покрова; l — половина длины контейнера; b — половина ширины контейнера; h — высота контейнера; P — давление на щеку; B , L , H — ширина, длина и высота полости соответственно.

Таблица 2

Зависимость параметров контейнера, при которых
происходит полное разрушение ледяного покрова, от его толщины

h_0 , м	h , м	$2l$, м	$2b$, м
3,0	1,5	44,0	18,00
2,5	1,5	30,0	15,50
2,0	1,5	23,4	12,00
1,5	1,5	13,8	9,94
1,0	1,5	8,8	6,00
0,5	1,5	5,0	3,90

тре контейнера лед провисает, внизу вдоль оси симметрии (координата x_3) образуется начальная полость шириной $B = 1,3$ мм, длиной $L = 3l/2$ и высотой $H = h_0/4$.

Этап 2. По мере раздвижения щек длина контейнера увеличивается, вдоль оси симметрии нарушения сплошности развиваются снизу вверх, на периферии — сверху вниз. Кроме того, ледяной покров начинает разрушаться по растягивающим напряжениям σ_{22} в нижней части (плоскость симметрии $x_2 = 0$) и в плоскости x_1x_3 на периферии.

Этап 3. По мере увеличения длины контейнера происходит рост полости вверх в плоскостях симметрии $x_3 = 0$ и $x_2 = 0$. Лед еще больше проседает, опускаясь вместе с контейнером и увеличивая полость на периферии по координате x_2 в плоскости x_1x_3 . Кроме того, над контейнером происходит разрушение по растягивающим напряжениям $\sigma_{22} = 1,56$ МПа (в нижней части ледяной пластины), по сжимающим напряжениям $\sigma_{33} = -4,1$ МПа (на поверхности льда), а также по сжимающим напряжениям $\sigma_{22} = -2,36$ МПа (на поверхности льда).

Этап 4. При расхождении щек до номинальной длины $2l$ (см. табл. 2) на периферии продолжается процесс нарушения сплошности ледяного покрова, а в центре происходит его разлом. Атмосферный воздух с огромной скоростью устремляется в направлении разреженного пространства, происходит “хлопок” и взрыв ледяной массы над контейнером.

Аппроксимируя методом наименьших квадратов результаты расчетов, получим формулу для вычисления оптимальной длины контейнера:

$$l = 6,1419h_0 e^{-1,7045h_0/b} e^{0,4291v/v_x} (\sigma_{33}/\sigma_x)^{0,5 \ln(h/h_x)},$$

где $h \geq 0,5h_0$; $b \geq 3h_0$; $v \geq 0,16$ м/с; σ — принятый критерий прочности льда, МПа; $v_x = 1$ м/с — нормирующая скорость; $\sigma_x = 1$ МПа — нормирующее напряжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Одинокоев В. И., Сергеева А. М.** Математическое моделирование одного нового процесса разрушения ледяного покрова // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 2. С. 139–146.
2. **Пат. 2220878 РФ, 7 МПК В 63 В 35/08.** Способ разрушения ледяного покрова / В. И. Одинокоев, В. М. Козин. Опубл. 10.01.04, Бюл. № 1.
3. **Бердяников В. П.** Изучение модуля упругости льда // Тр. Горьк. политехн. ин-та. 1948. Вып. 7. С. 13–23.
4. **Богородский В. В.** Физические свойства. Современные методы гляциологии / В. В. Богородский, В. П. Гаврило. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
5. **Полярус А. М., Романов Д. Ю.** Об одном способе разрушения ледяного покрова // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения: Сб. докл. 2-й конф., Владивосток, 31 авг. — 6 сент. 2003 г. Комсомольск-на-Амуре: Ин-т машиноведения и металлургии ДВО РАН, 2003. С. 23–28.

*Поступила в редакцию 11/VII 2006 г.,
в окончательном варианте — 16/II 2007 г.*
