Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Российский государственный гидрометеорологический
университет

К.Е. Сазонов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(Руководство к лабораторным работам)
Специальности: 073300 (020603) – океанология
013600 (02804) – геоэкология

Санкт-Петербург
2006

УДК 620.2

Сазонов К.Е. Материаловедение. Руководство к лабораторным работам.– СПб., изд. РГГМУ, 2006. – 96 с.

Приводится описание методик выполнения лабораторных работ по дисциплине "Материаловедение". Половина работ посвящена изучению свойств традиционных конструкционных материалов, находящих применение в морских технологиях. В другой половине работ рассматриваются свойства таких естественных материалов, как лед и снег.

Предназначено для студентов океанологов и экологов.

уг. и 1262

Рецензенты: В.К. Гончаров, д-р техн. наук, проф. (СПбГМТУ);
Н.Ю. Клементьева, канд. техн. наук (ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова).

© Сазонов К.Е., 2006.
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2006.

Российский государственный
гидрометеорологический университет
БИБЛИОТЕКА
195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 4

Лабораторная работа № 1.
Определение механических характеристик стали
по диаграмме растяжения 5

Лабораторная работа № 2.
Обработка результатов испытаний металлов на выносливость
и расчет долговечности 14

Лабораторная работа № 3.
Оптимальное проектирование троса для буксировки
забортного океанографического оборудования 23

Лабораторная работа № 4
Расчет катодной и протекторной защиты подводной
части сооружения 37

Лабораторная работа № 5.
Расчетное определение пределов прочности льда 47

Лабораторная работа № 6.
Определение прочностных характеристик
моделированного морского льда 61

Лабораторная работа № 7.
Определение плотности моделированного морского льда 74

Лабораторная работа № 8.
Расчетное определение характеристик пенольда 82

Лабораторная работа № 9.
Определение деформативной и термической
устойчивости сооружений из льда 88

Предисловие

"Материаловедение" читается студентам IV курса с целью дать им необходимые сведения о традиционных и естественных конструкционных материалах, которые используются в морских технологиях. "Материаловедение" разбито на две части. В первой части дисциплины изучаются свойства традиционных конструкционных материалов (железоуглеродистые сплавы, сплавы цветных металлов, электротехнические материалы и др.). Во второй части рассматриваются свойства и хозяйственное применение таких естественных материалов, как лед и снег.

Лабораторные работы также можно разбить на две части. В первых двух работах изучаются приемы обработки данных экспериментов по определению механических свойств традиционных конструкционных материалов, а также методы расчета долговечности конструкций. В работе № 3 рассматривается методика оптимального проектирования троса для буксировки подводных носителей океанографической аппаратуры. В работе № 4 изучаются простейшие методы расчета катодной и протекторной защиты подводной части сооружений от коррозии в морской воде.

В последних четырех работах изучаются методы определения основных характеристик морского льда, моделированного льда и пенольда. Эти естественные материалы в последнее время находят все более широкое применение в хозяйственной деятельности человека в полярных регионах.

Исходными данными для части работ (№ 1, № 2 и № 6) служат экспериментальные результаты, полученные в специализированных лабораториях. Получение этих данных является трудоемким и дорогостоящим делом и не может быть обеспечено в рамках лабораторных занятий.

Некоторые лабораторные работы, например, лабораторная работа № 3 может быть использована как основа для выполнения курсового проекта.

Структура описания каждой лабораторной работы традиционная. Некоторые расчетные формулы приводятся в работе без вывода. Вывод формул должен быть выполнен студентами самостоятельно. Число исходных данных к каждой работе ограничено 10 вариантами.

Отчеты по лабораторным работам оформляются так же, как и в других учебных курсах и обязательно содержат физический анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 1

Определение механических характеристик стали по диаграмме растяжения

Литература

1. Всеволодов Г.Н., Маневич С.Л. Растяжение и кручение стержней. – Л., изд. ЛКИ, 1985. – 98 с.

2. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств материалов.– М.: Машиностроение, 1965. – 488 с.

Общие пояснения

Одним из основных видов механических испытаний материалов является испытания на растяжение. Результаты испытаний обычно представляются в виде зависимости напряжения σ от относительного удлинения ε. Эти величины вычисляются по следующим формулам:

$\sigma = \dfrac{P}{A_0}$, где P – растягивающее усилие, действующее на образец; $A_0 = \dfrac{\pi d_0^2}{4}$ – площадь поперечного сечения не деформированного цилиндрического образца; d_0 – диаметр образца;

ε – относительное удлинение;

$\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l_0}$, где l_0 – начальная длина образца, Δl – удлинение образца под действием силы P.

В соответствии с требованием стандартов испытаниям на растяжение подлежат цилиндрические образцы, диаметр рабочей части d_0 которых принимается равным 10, 15 и 20 мм, а длина цилиндрической части устанавливается равной $l_0 = 5d_0$ или $l_0 = 10d_0$.

Типичный вид диаграммы растяжения представлен на рис. 1.1.

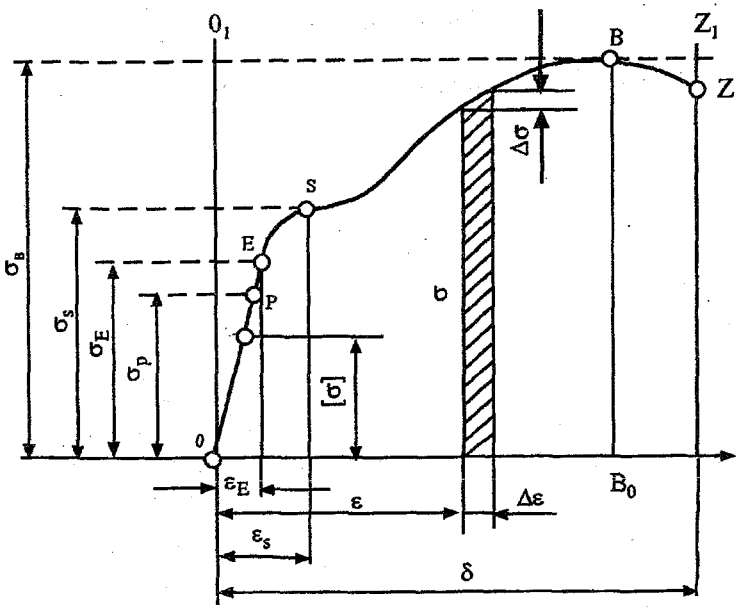


Рис. 1.1. Типичная диаграмма растяжения металла

По диаграмме растяжения определяют следующие механические характеристики материала:

– условный предел пропорциональности σ_p – наибольшее напряжение, для которого выполняется закон Гука;

– условный предел упругости σ_n – наибольшее напряжение, при котором возникающие в материале пластические деформации не превышают 0.05 %, т.е. можно считать, что до этого напряжения материал деформируется упруго, хотя и уже и не подчиняется закону Гука;

– предел текучести σ_τ – напряжение, при котором наблюдается площадка текучести;

– условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ – напряжения, при которых остаточные пластические деформации составляют 0.2 %;

– временное сопротивление $\sigma_в$ – наибольшее напряжение, которое может воспринимать материал;

– истинное сопротивление разрыву S_k – истинное напряжение, при котором происходит разрушение образца;

– относительное удлинение после разрыва δ в %;

– относительное сужение после разрыва ψ в %.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Приближенно условный предел пропорциональности σ_P может быть определен по диаграмме растяжения как точка, в которой зависимость напряжения от относительного удлинения перестает быть линейной. Эта точка определяется графически. Для этого начальный участок диаграммы растяжения строится в увеличенном масштабе (подходящий масштаб студенты выбирают самостоятельно). По экспериментальным точкам проводится линейная зависимость и определяется место отклонения экспериментальной зависимости от линейной функции (см. рис. 1.2).

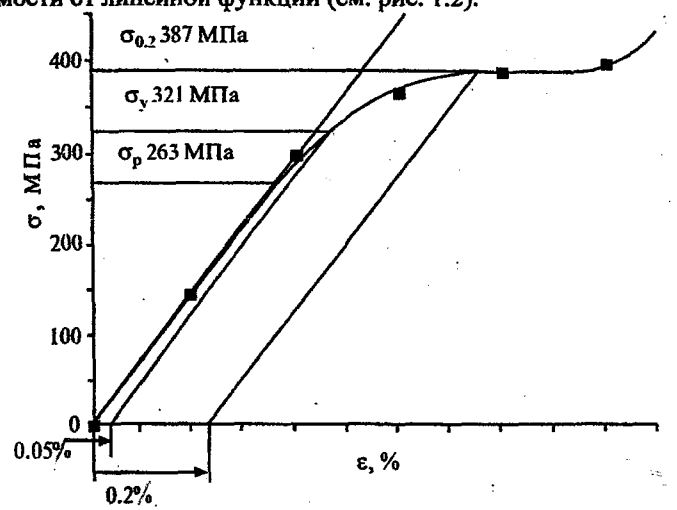


Рис. 1.2. Графическое определение предела пропорциональности, условного предела упругости и условного предела текучести

Условный предел упругости определяется как напряжение, при котором остаточные пластические деформации составляют 0.05 %. Для определения этого предела необходимо, отложив на оси абсцисс точку с координатой 0.05 %, провести из нее линии, параллельные линейному участку диаграммы растяжения. Пересечение этой линии с зависимостью $\sigma = f(\varepsilon)$ дает значение условного предела упругости (см. рис. 1.2).

Предел текучести $\sigma_т$ находится по положению площадки текучести на диаграмме растяжения. Не во всех испытаниях площадка текучести четко определяется. На рис. 1.3 приведены примеры нахождения предела текучести для различных видов кривой $\sigma = f(\varepsilon)$.

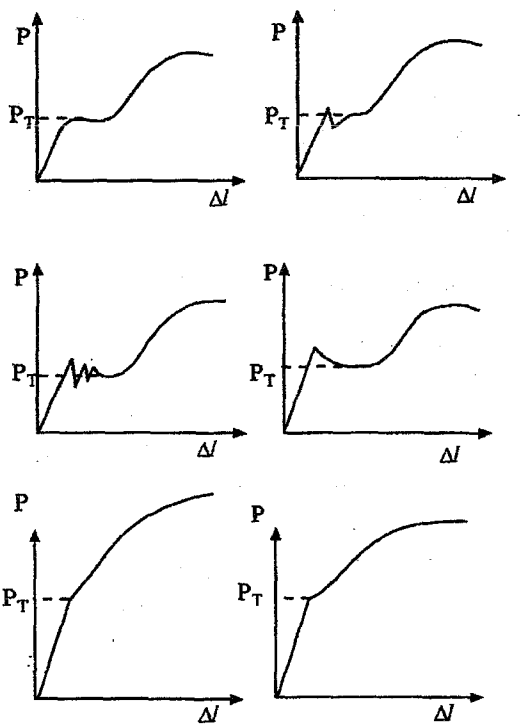


Рис. 1.3. Определение предела текучести $\sigma_т$ графическим методом

Методика графического определения условного предела текучести $\sigma_{0.2}$ аналогична методике, которая использовалась при определении условного предела упругости. Отличие заключается в том, что на оси абсцисс необходимо отложить остаточную деформацию, равную 0.2 % (см рис. 1.2).

Временное сопротивление $\sigma_{в}$ находится, как наибольшее напряжение на диаграмме растяжения материала. Начиная с этого значения, при увеличении относительного удлинения образца напряжения больше не возрастают.

Определенные выше механические характеристики материала являются условными, так как. они определяются без учета уменьшения площади поперечного сечения образца в процессе деформирования. Вплоть до напряжений, соответствующих пределу текучести, изменение площади поперечного сечения образца невелико. Однако при дальнейшем деформировании происходит уже значительное уменьшение площади поперечного сечения. Поэтому помимо условных механических характеристик материала определяют еще и истинные:

– истинный предел текучести $S_T = \frac{P_T}{A_T}$, здесь P_T, A_T – усилие и площадь поперечного сечения образца в точке, соответствующей концу площадки текучести диаграммы растяжения;

– истинное временное сопротивление $S_B = \frac{P_B}{A_B}$, здесь P_B, A_B – усилие и площадь поперечного сечения образца в точке, соответствующей временному сопротивлению диаграммы растяжения;

– истинное напряжение при разрыве $S_K = \frac{P_K}{A_K}$, здесь P_K, A_K – усилие и площадь поперечного сечения образца в точке, соответствующей разрыву образца.

Истинные напряжения представляют в виде диаграммы истинных напряжений, которую строят в координатах $S - \Psi$, где $\Psi = \frac{A_0 - A}{A_0}$ – относительное сужение площади поперечного сечения образца, A – площадь сечения в данный момент деформиро-

вания. Типичная диаграмма истинных напряжений представлена на рис. 1.4.

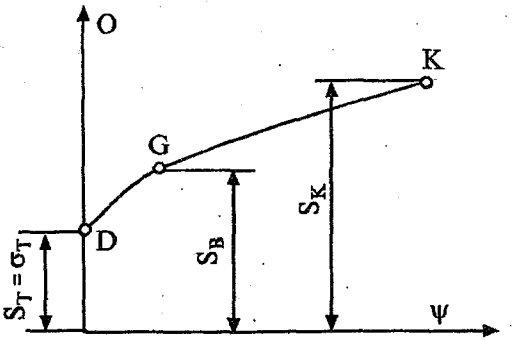


Рис. 1.4. Типичная диаграмма истинных напряжений

Как следует из этой диаграммы, истинные напряжения постоянно возрастают вплоть до момента разрушения. Между условными и истинными напряжениями существуют следующие соотношения:

$$\sigma_т < \sigma_в < S_в < S_к .$$

Связь между истинными и условными напряжениями задается соотношением (эту формулы студенты должны вывести самостоятельно):

$$S = \frac{\sigma}{1 - \Psi} .$$

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 1.1.и 1.2, варианты 0 - 9. Все данные относятся к стандартному образцу диаметром 20 мм и длиной 200 мм.

Таблица 1.1

Зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$, МПа ; $\varepsilon = k\delta$

σ

k	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,025	143	172 0,45	114	152	134	147	138	137	145	132
0,05	296	355 0,9	237	314	278	305	287	284	301	275
0,075	367	440 1,35	294	389	345	378	356	352	373	340
0,1 1,8	393	471 1,8	314	417	369	405	381	377	399	364
0,125	400	500 2,25	350	440	400	380	388	364	426	370
0,15	400	480 2,7	300	410	376	420	388	394	406	370
0,175	400	480 3,15	330	424	376	412	388	380	406	380
0,2	400	480 3,6	320	424	376	412	388	390	406	360
0,225	405	486 4,05	324	429	381	417	392	389	411	375
0,25	425	510 4,5	340	451	400	437	412	408	432	393
0,375	505	606 6,75	404	535	474	520	490	485	513	468
0,5	550	660 9	440	583	517	566	533	528	559	509
0,625	556	667 11,25	445	589	523	573	539	533	565	516
0,75	527	632 13,5	422	559	495	542	511	507	534	488
0,875	459	551 15,75	367	486	431	473	445	441	466	425
1 1,8	356	427	289	377	335	367	345	342	367	330

Таблица 1.2

Относительное удлинение в момент разрыва и сужение площади образца

№ варианта	δ, %	Ψ, %		
		$S_т$	S_B	S_K
0	18	1	13	68
1	18	2	14	69
2	19	2	15	70
3	20	1	16	71
4	21	1	15	72
5	19	2	14	71
6	17	1	13	70
7	22	2	14	69
8	18	2	15	68
9	19	1	16	67

Порядок выполнения работы

1. Строится зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ по табличным данным. По этой зависимости определяется временное сопротивление σ_B и, если это возможно, предел текучести $\sigma_т$.

2. Строится начальная часть графика зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ для графического определения предела пропорциональности σ_P, условного предела упругости $\sigma_У$ и условного предела текучести $\sigma_{0.2}$.

3. Рассчитываются истинные значения предела текучести $S_т$, временного сопротивления S_B и истинного напряжения при разрыве S_K. По этим и приведенным в таблице данным строится диаграмма истинных напряжений.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1. График зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ (диаграмма растяжения материала, рис. 1.1).

2. Вспомогательные графики для графического определения предела пропорциональности σ_p, условного предела упругости σ_y и условного предела текучести $\sigma_{0.2}$.

3. График истинных напряжений.

4. Сводка результатов определения прочностных характеристик материала.

5. Анализ результатов, включающий вывод расчетных формул.

Лабораторная работа № 2

Обработка результатов испытаний металлов на выносливость и расчет долговечности

Литература

Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 1965. - 488 с.

Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. М.: Наука, 1990. – 240 с.

Общие пояснения

В середине прошлого века инженеры во всем мире столкнулись с проблемой катастрофического разрушения конструкций (судов, самолетов и т.п.) при действии нагрузок, величина которых была существенно ниже критических. Детальное изучение этих происшествий показало, что главной причиной аварий является усталость металла. Явление усталости, заключающееся в накоплении в материале повреждений, было открыто и впервые исследовано в середине XIX в. немецким инженером А. Велером. Им были введены кривые выносливости материала (кривая Велера) и понятие предела выностивости σ_f. Предел выносливости определяет наибольшее напряжение, при котором образец не разрушится при сколь угодно большом числе циклов нагружения. Типичная кривая Велера приведена на рис. 2.1.

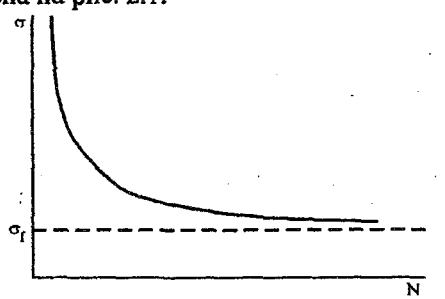


Рис. 2.1. Типичная кривая выносливости (кривая Велера) для железа и стали (N – количество циклонов)

Кривые выносливости материала определяют при проведении специальных испытаний на выносливость. При определении предела выносливости применяются многие методы, но наиболее распространенным до сих пор является метод, предложенный еще А. Велером. Образец материала сначала подвергают действию периодически изменяющихся напряжений, величина которых заведомо превышает предел выносливости. При испытаниях последующих образцов из того же материала величину периодичеси изменяющихся напряжений постепенно снижают, до тех пор, пока образец не станет разрушаться при заданном числе циклов нагружения.

В результате таких испытаний обычно разрушают 6 - 8 образцов и по полученным данным определяют предел выносливости материала.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

На практике применяется несколько методов построения кривых выносливости и определения по ним предела выносливости. Эти методы различаются только координатами осей, в которых строятся кривые. Четыре наиболее распространенных мварианта построения кривых представлены на рис. 2.2.

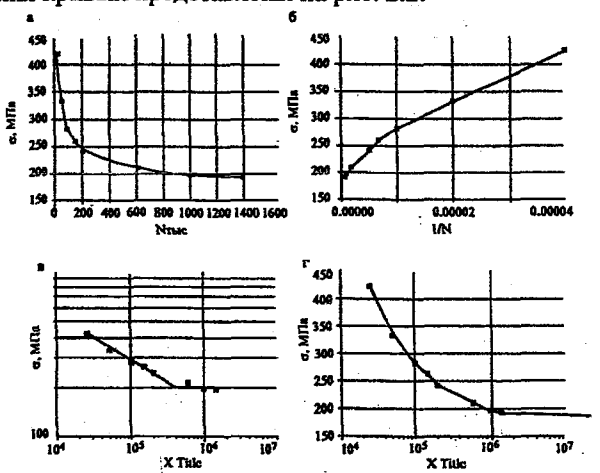


Рис. 2.2. Диаграммы для определения предела выносливости. (N – количество циклонов)

На рис. 2.2, А по координатным осям отложены напряжения σ и количество циклов N. При увеличении N экспериментальная кривая асимптотически стремиться к линии, параллельной оси абсцисс. Ордината, соответствующая этой асимптоте, принимается за предел пропорциональности σ_f.

На рис 2.2, Б по оси ординат отложены напряжения, а по оси абсцисс число $1/N$, обратное числу циклов. Значение предела выносливости определяется экстраполяцией экспериментальной кривой в точку $1/N = 0$, которая находится на оси ординат. Такой способ обычно применяется для приближенного определения предела выносливости по результатам испытаний 3–4 образцов.

На рис 2.2, В напряжения и число циклов построены в логарифмическом масштабе. Благодаря использованию этого масштаба, экспериментальная кривая получается состоящей из двух прямых линий. Ордината точки их пересечения принимается за предел выносливости материала.

На рис. 2.2, Г по оси ординат откладываются напряжения в обычном масштабе, а по оси абсцисс число циклов в логарифмическом. Из-за использования логарифмического масштаба по оси абсцисс, экспериментальная кривая получается с заметным перегибом, переходящим в участок, параллельный оси абсцисс. По ординате этого участка определяется предел выносливости.

Величина предела выносливости является характеристикой материала, которая показывает, какое сопротивление оказывает материал развитию усталостных повреждений. Если известно, что проектируемая конструкция (деталь) будет эксплуатироваться при действии периодически изменяющихся нагрузок, то, очевидно, конструктор для нее выберет материал, обладающий высоким пределом выносливости. Знание предела выносливости материала позволяет рассчитать его долговечность.

На практике часто возникают задачи определения долговечности той или иной конструкции (детали) при обнаружении в ней трещин. Эти задачи могут быть решены с помощью раздела механики, который называется теория трещин. Поэтому при проведении исследований механических свойств материалов, помимо предела выносливости определяют закон роста усталостной трещины. Из-

вестно, что для описания роста усталостной трещины используется закон Париса, который можно записать следующим образом:

$$\frac{dl}{dN} = A\left(Y\Delta\sigma\sqrt{l}\right)^n, \qquad (2.1)$$

где A и n эмпирические коэффициенты, определяемые из опыта; $\Delta\sigma$ – размах напряжения; Y – функция, учитывающая влияние конечных размеров конструкции (детали) на развитие усталостной трещины; l – длина трещины.

Результат интегрирования выражения (2.1) можно записать следующим образом:

$$\int_{l_0}^{l} \frac{dl}{Y^n l^{n/2}} = A(\Delta\sigma)^n N. \qquad (2.2)$$

В общем случае Y зависит от длины трещины l и поэтому нахождение аналитической зависимости для длины трещины затруднено. Однако для многих инженерных задач можно приближенно считать, что $Y = \text{const}$, тогда легко получить аналитическую зависимость длины трещины от числа циклов:

$$l_0^{\left(1-\frac{n}{2}\right)} - l^{\left(1-\frac{n}{2}\right)} = \left(\frac{n}{2}-1\right)A\left(Y\Delta\sigma\right)^n N. \qquad (2.3)$$

В механике разрушения вводятся такие понятия как вязкость разрушения (трещиностойкость) K_{Ic}, характерирующее сопротивление материала развитию трещины и критическая длина трещины l_c, т.е. тот размер трещины, начиная с которого в заданных условиях начинается ее катастрофический рост. Вязкость разрушения материала определяется опытным путем при испытании специальных образцов. Критическая же длина трещины индивидуальна для каждого рассматриваемого случая и определяется расчетным путем. Вязкость разрушения, критическая длина трещины и предел выносливости материала связаны следующим соотношением:

Ул. к 1262

Российский государственный гидрометеорологический университет
БИБЛИОТЕКА
195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

$$K_{Ic} = \sigma_f \sqrt{l_c} Y. \qquad (2.4)$$

Это соотношение задает наибольший размер трещины, который может находиться в материале, при этом материал не разрушается при заданном числе циклов нагружения. Фактически это размер дефектов самого материала. Если же в процессе эксплуатации по каким-либо причинам в конструкции (детали) возникнут трещины, то дальнейшая ее долговечность будет определяться соотношениями (2.1) –(2.3).

Ниже мы рассмотрим решение задачи о долговечности цилиндрического стержня, работающего на растяжение под действием переодичеси изменяющейся нагрузки.

В одной из конструкций морского инженерного сооружения, представляющей собой стальной цилиндрический стержень диаметром 0.3 м была обнаружена поверхностная трещина глубиной $l = 4.5$ мм. При качке инженерного сооружения на эту конструкцию действует растягивающее усилие 4.53 МН. Необходимо определить какое количество циклов нагружения может выдержать данная конструкция до разрушения, если критическая длина трещины составляет 60 мм, а эмпирические коэффициенты равны $A = 1.7 \cdot 10^{-11}$ и $n = 3.5$.

Вначале определим величину напряжений, действующих в данной конструкции. Площадь поперечного сечения стержня равна $S = \pi \frac{d^2}{4} = 3.14 \frac{(0.3)^2}{4} = 0.071$ м^2, наибольшее напряжение в стержне $\sigma = \frac{4.53}{0.071} = 64$ МПа. За время, равное одному полупериоду качки, величина напряжения изменяется от 0 до 64 МПа, следовательно, размах напряжений составит $\Delta\sigma = 64$ МПа. Для того чтобы воспользоваться выражениями (2.1–2.3) необходимо определить функцию Y. Для рассматриваемой задачи можно воспользоваться известной функцией Y, полученной для цилиндра с кольцевой трещиной. Если обнаруженная в конструкции трещина не целиком охватывает стержень, то, заменяя ее на кольцевую, мы делаем ошибку в безопасную сторону. Указанная функция Y задана в табличном виде (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Функция Y для цилиндра с кольцевой трещиной

$\lambda = \frac{l}{R}$	Y
0.03	1.88
0.05	1.82
0.1	1.66
0.2	1.41
0.4	1.01

Здесь R – радиус цилиндра.

С помощью этой таблицы найдем, что для $l_0 = 0.0045$ м $Y = 1.88$, а для $l = 0.06$ м $Y = 1.01$. Для получения инженерной оценки долговечности берем наибольшее значение $Y = 1.88$ и далее считаем его постоянным. Тогда мы можем воспользоваться решением (2.3):

$$(0.0045)^{-0.75} - l^{-0.75} = 0.75 \cdot 1.7 \cdot 10^{-11} \cdot (1.88 \cdot 64)^{3.5} N$$

или

$$l = \left(57.56 - 2.44 \cdot 10^{-4} N\right)^{-1.33} \text{ м.}$$

Используя последние выражение можно расчитать долговечность стержня, т.е. определить, при каком N длина трещины станет равной 60 мм. Расчеты показывают, что критическая длина трещины будет достигнута после 20200 циклов нагружения. Период бортовой качки морской буровой установки составляет 25–40 с. За период напряжения в стержне дважды достигают максимальных значений. Примем для определенности, что период равен 30 с, тогда для достижения трещиной критического значения потребуется 10100 с штормового времени или 2,8 ч. Очевидно, что данная конструкция с такой начальной трещиной разрушится в течение первого же шторма, поэтому до выхода в море эта конструкция должна быть заменена.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 2.2 и 2.3, варианты 0–9. В табл. 2.2. приведены результаты испытаний материала на выносливость. В табл. 2.3. содержатся исходные данные для решения задачи о долговечности крановой балки с трещиной

Таблица 2.2.

Результаты испытаний материала на выносливость, напряжения, МПа

Число циклов, тыс.	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	420	462	378	441	399	389,3	366,7	407	391	392,7
50	330	363	297	346,5	313,5	305,9	288,1	319,7	307,2	308,5
100	280	308	252	294	266	259,6	244,4	271,3	260,7	261,8
150	260	286	234	273	247	241,2	227	251,9	242,1	243,1
200	240	264	216	252	228	222,5	209,5	232,6	223,4	224,4
600	210	231	189	220,5	199,5	194,7	183,3	203,5	195,5	196,4
1000	195	214,5	175,5	204,8	185,2	180,8	170,2	189	181,5	182,3
1400	190	209	171	199,5	180,5	176,1	165,9	184,1	176,9	177,7
2000	189,9	208,9	170,91	199,4	180,4	176	165,9	184	176,8	177,6

Таблица 2.3

Данные для решения задачи

Параметры.	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l, мм	30	45	40	35	20	25	60	55	50	65
b, мм	200	250	300	250	200	250	300	2500	300	200
σ, МПа	170	140	150	170	180	200	90	70	120	100
K_{Ic}, МПа·м^{0,5}	165	140	120	150	100	90	60	50	70	80
C	1.7	1.8	2	1.5	1.4	1.3	3	2.5	1.9	1.6
m	-11	-12	-11	-12	-11	-12	-11	-12	-11	-12
n	3,5	3,2	3,0	2,9	2,5	2,6	3,2	3,3	2,9	3,6

В этой таблице эмпирический коэффициент A представлен в виде

$$A = C \cdot 10^{m}.$$

Порядок выполнения работы

1. По табличным данным строятся четыре варианта кривой долговечности и по ним определяется предел выносливости материала.

2. Решается задача определения долговечности крановой балки, содержащей трещину.

Задача. В крановой балке, используемой для спуска за борт океанографических приборов, обнаружена трещина длиной l. Ширина балки b. При эксплуатации в балке возникают максимальные растягивающие напряжения σ. Вязкость разрушения стали, из которой изготовлена крановая балка, составляет K_{Ic}. Функция Y для рассматриваемого случая равна:

$$Y = 1.99 - 0.41\lambda + 18.7\lambda^2 \quad - 38.48\lambda^3 + 53.85\lambda^4,$$

где $\lambda = \dfrac{l}{b}$ – относительная глубина трещины.

Порядок решения задачи.

1. Вычисляем величину функции Y при заданной длине трещины.

2. На основании соотношения (2.4) вычисляем критическую длину трещины

$$l_c = \left(\frac{K_{Ic}}{Y\sigma}\right)^2.$$

3. Определяем размах изменений напряжений за цикл нагружения $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$. Принимаем, что при отсутствии нагрузки на крановую балку напряжения в ней равны нулю.

4. По формуле (2.3) рассчитываем предельно возможное число циклов нагружения

$$N = \frac{l_0^{\left(1-\frac{n}{2}\right)} - l_c^{\left(1-\frac{n}{2}\right)}}{A\left(\frac{n}{2}-1\right)(Y\Delta\sigma)^n}.$$

В этой формуле $\Delta\sigma$ имеет размерность МПа.

5. Анализ полученного решения.

Составление отчета

В отчет о лабораторной работе входят

1. Графики кривых выносливости материала с графическими построениями, необходимыми для определения пределов выносливости материала.

2. Сводка результатов определения различными способами предела выносливости материала.

3. Решение задачи о долговечности крановой балки с трещиной.

4. Анализ всех результатов лабораторной работы.

Лабораторная работа № 3

Оптимальное проектирование троса для буксировки забортного океанографического оборудования

Литература

1. *Черепанов Г.П., Ершов Л.В.* Механика разрушения.- М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

2. Динамика подводных буксируемых систем / *Поддубный В.И., Шамарин Ю.Е., Черненко Д.А., Астахов Л.С.* – СПб: Судостроение, 1995. – 200 с.

3. Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 726 с.

Общие пояснения

Оптимальное проектирование конструкций представляет собой обратную задачу механики деформируемого тела. При оптимальном проектировании по заданному распределению напряжений и деформаций необходимо найти удовлетворяющую этому заданию форму конструкции. Обычно решение обратной задачи более сложное, чем решение прямой. Однако в оптимальном проектировании существуют подходы, позволяющие в простейших случаях свести проектирование к строго поставленным математическим задачам, а в более сложных – помогающие искусству конструктора. Один из таких подходов базируется на эвристическом *принципе равнопрочности.*

Этот принцип целесообразно использовать, когда большинство геометрических параметров конструкции примерно известно и необходимо определить оставшиеся неизвестными геометрические параметры. Принцип равнопрочности позволяет в этом случае свести проектирование к некоторой прямой математической задаче относительно оставшихся неопределенных геометрических параметров. При использовании принципа равнопрочности принимаются следующие допущения.

1. Конструкция сделана из надежного материала и не содержит опасных дефектов металлургического или технологического про-

исхождения, не обнаруженных методами неразрушаемого контроля.

2. Конструкция работает в условиях, исключающих появление и опасное развитие в ней эксплуатационных трещин за время эксплуатации.

3. Считается, что локальное разрушение приводит к разрушению или потере работоспособности конструкции в целом.

Конструкция, удовлетворяющая требованиям 1–3 называется равнопрочной. Разрушение такой конструкции, если она будет спроектирована и построена, при превышении нагрузкой критического значения начинается одновременно во всех точках конструкции. Материал в такой конструкции работает равномерно. Можно показать, что выполнение принципа равнопрочности обеспечивает проектирование конструкции с минимальным весом, из всех возможных конструкций, выдерживающих заданные нагрузки.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Рассмотрим возможность применение принципа равнопрочности при выборе троса для буксировки забортного океанографического оборудования. Схема буксировки носителя аппаратуры и принятая система координат представлены на рис. 3.1.

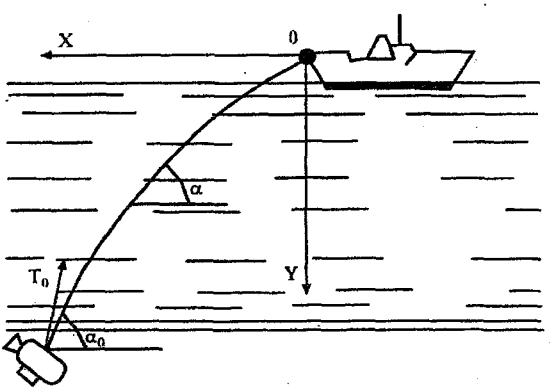


Рис. 3.1 Схема буксировки носителя аппаратуры

Решение задачи о равновесии кабель-троса в плоскопараллельном потоке в стационарной постановке описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$T\frac{d\alpha}{ds} \quad \frac{c\rho Dv^2}{2}\sin\alpha + p\cos\alpha = 0, \tag{3.1}$$

$$\frac{dT}{ds} + \frac{c\rho Dv^2}{2}\cos\alpha + p\sin\alpha = 0, \tag{3.2}$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos\alpha, \tag{3.3}$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin\alpha. \tag{3.4}$$

Здесь T – натяжение троса; α - угол наклона троса к горизонтали; c – коэффициент лобового гидродинамического сопротивления троса, $c = 1.1$; $\rho = 1020\,кг/м^3$ - плотность воды; D – диаметр троса, м; v – скорость буксировки, м/с; p – погонный вес кабель-троса, Н/м; s – текущая длина дуги троса (при $x = 0 \quad s = 0$). Полную длину троса обозначим l. Система уравнений (3.1) – (3.4) получена в предположении, что гидродинамическая нагрузка, приложенная к элементу троса, направлена по скорости набегающего потока.

Граничные условия обычно задают в следующем виде, используя параметрическое описание функций, в качестве параметра выбирается текущая длина дуги троса:

$$T(l) = T_0, \quad \alpha(l) = \alpha_0, \quad x(0) = 0, \quad y(0) = 0. \tag{3.5}$$

Величины T_0 и α_0 определяются расчетным путем или при проведении модельных испытаний подводных носителей аппаратуры в опытовых бассейнах или аэродинамических трубах. В данной работе предполагается, что эти величины заданы.

В случае когда величиной погонного веса кабель-троса можно пренебречь, система (3.1) –(3,5) допускает аналитическое решение прямой задачи, в которой определяются форма троса, а также действующее в нем натяжения. При решении считается, что диаметр

троса постоянен. Далее мы также будем рассматривать систему (3.1) –(3,5) в предположении $p = 0$.

Принцип равнопрочности означает для рассматриваемой системы выполнение следующего равенства:

$$T = \frac{\sigma_B}{n}\frac{\pi D^2}{4}, \tag{3.6}$$

где n – коэффициент запаса, σ_B - временное сопротивление троса.

Попробуем решить обратную задачу и спроектировать трос, удовлетворяющий условию равнопрочности (3.6). Подставив (3.6) и (3.3) в уравнение (3.2), получим:

$$\frac{\sigma_B}{n}\frac{\pi}{2}DdD + \frac{c\rho D v^2}{2}dx = 0 \tag{3.7}$$

Решением этого уравнения будет выражение:

$$D = -\frac{nc\rho v^2}{\pi\sigma_B}x + C. \tag{3.7}$$

Произвольную постоянную C определим из условия при

$$s = l \quad T = T_0 \quad D_0 = \sqrt{\frac{4nT_0}{\pi\sigma_B}}.$$

$$C = \sqrt{\frac{4nT_0}{\pi\sigma_B}} + \frac{nc\rho v^2}{\pi\sigma_B}x(l). \tag{3.8}$$

Окончательно зависимость для диаметра троса может быть записана следующим образом:

$$D=\sqrt{\frac{4nT_0}{\pi\sigma_B}}+\frac{nc\rho v^2}{\pi\sigma_B}[x(l)-x(s)]=A-Bx(s),$$

$$B=\frac{nc\rho v^2}{\pi\sigma_B}, \tag{3.9}$$

$$A=\sqrt{\frac{4nT_0}{\pi\sigma_B}}+Bx(l).$$

Продифференцируем выражение (3.3) по s, в результате получим:

$$\frac{x''}{\sin\alpha}=\frac{d\alpha}{ds}. \tag{3.10}$$

Здесь и далее штрих означает дифференцирование по s. Подставим выражения (3.4), (3.9) и (3.10) в уравнение (3.1).

$$\frac{\sigma_B}{n}\frac{\pi}{4}Dx''+\frac{c\rho v^2}{2}y'^2=0. \tag{3.11}$$

Для преобразования этого уравнения воспользуемся основным тригонометрическим тождеством $\sin^2\alpha+\cos^2\alpha=1$ и уравнениями (3.3) и (3.4). В итоге получим дополнительное уравнение:

$$x'^2+y'^2=1. \tag{3.12}$$

Исключая из выражений (3.11) и (3.12) y', получим дифференциальное уравнение:

$$(A-Bx)x''+2B(1-x'^2)=0. \tag{3.13}$$

Введем замену $x' = p$, $x'' = \frac{dp}{dx}\frac{dx}{ds} = p\frac{dp}{dx}$ и поделим уравнение на p. При этом мы исключаем из рассмотрение решение $p = 0$, которое соответствует равенству константе координаты x. Это решение описывает кабель-трос, опускающийся вертикально вниз. Ясно, что физически при наличии скорости буксировки носителя аппаратуры такое решение не может быть реализовано. В результате этих преобразований получается уравнение:

$$(A - Bx)\frac{dp}{dx} + \frac{2B}{p}\left(1 - p^2\right) = 0, \qquad (3.14)$$

которое может быть решено методом разделения переменных. Решение этого уравнения может быть записано следующим образом:

$$\frac{1}{2B}\ln\left|1 - p^2\right| = \frac{1}{B}\ln\left|A - Bx\right| + \ln C_1. \qquad (3.15)$$

Выражения, стоящие под знаком модуля в левой и правой частях равенства, по своему физическому смыслу всегда положительны, поэтому выражение (3.15) может быть переписано без знаков модуля. Разрешив это выражение относительно p, в результате получим:

$$p = \sqrt{1 - C_1^{\,2}(A - Bx)^2} = \frac{dx}{ds} = \cos\alpha. \qquad (3.16)$$

Из этого выражение легко определяется произвольная постоянная

$$C_1 = \frac{\sin\alpha_0}{A \quad - Bx(l)} = \sin\alpha_0\sqrt{\frac{\pi\sigma_B}{4nT_0}}. \qquad (3.17)$$

Выражение (3.16) может быть проинтегрировано для нахождения зависимости $x = x(s)$.

$$s=\int\frac{dx}{\sqrt{1-\sin^2\alpha_0\frac{(A-Bx)^2}{(A-Bx(l))^2}}}+$$

$$+C_2=-\frac{A-Bx(l)}{B\sin\alpha_0}\arcsin\left[\frac{\sin\alpha_0}{A-Bx(l)}(A-Bx)\right]+C_2 \qquad (3.18)$$

Постоянная интегрирования C_2 определяется из условия при $s=0 \quad x=0$.

$$C_2=\frac{1}{BC_1}\arcsin AC_1 \qquad (3.19)$$

Выполнив промежуточные выкладки, можно получить зависимость $x=x(s)$ и $x'=x'(s)$ в явном виде:

$$x=\frac{1}{BC_1}\left\{AC_1\left[\cos(BC_1s)-1\right]+\sqrt{1-A^2C_1^2}\sin(BC_1s)\right\} \qquad (3.20)$$

$$x'=AC_1\sin(BC_1s)+\sqrt{1-A^2C_1^2}\cos(BC_1s) \qquad (3.21)$$

Неопределенное ранее значение величины $x(l)$ можно найти из уравнения (3.20), положив в нем $s=l$. Для уменьшения объемов расчетов перейдем к безразмерным координатам $\bar{x}$ и $\bar{s}$.

$$\bar{x}=x\sqrt{\frac{\pi\sigma_B}{4nT_0}},\quad \bar{x}_l=x(l)\sqrt{\frac{\pi\sigma_B}{4nT_0}},\quad \bar{s}=s\sqrt{\frac{\pi\sigma_B}{4nT_0}}. \qquad (3.22)$$

В результате выражение (3.20) преобразуется к виду:

$$\bar{x}_l=\frac{1}{B\sin\alpha_0}\left\{\begin{array}{l}(1+B\bar{x}_l)\sin\alpha_0\left[\cos(B\sin\alpha_0\bar{l})-1\right]+\\+\sqrt{1-(1+B\bar{x}_l)^2\sin^2\alpha_0}\sin(B\sin\alpha_0\bar{l})\end{array}\right\}. \qquad (3.23)$$

Из этого выражения следует, что безразмерная абсцисса конца троса $\bar{x}_l$ зависит от трех безразмерных параметров: безразмерной

длины троса $\bar{l}$, угла α_0 и комплекса $B = \frac{nc\rho v^2}{\pi\sigma_B}$. Это уравнение приводится к обыкновенному квадратному алгебраическому уравнению:

$$\overline{x_l^2} + \overline{x_l}\frac{2}{B}\left\{\sin^2\left(B\sin\alpha_0\bar{l}\right) - \cos\left(B\sin\alpha_0\bar{l}\right)\left[\cos\left(B\sin\alpha_0\bar{l}\right) - 1\right]\right\} + \\ + \frac{1}{B^2}\left\{\begin{array}{l}\left[\cos\left(B\sin\alpha_0\bar{l}\right) - 1\right]^2 + \\ + \sin^2\left(B\sin\alpha_0\bar{l}\right)\left(1 - \frac{1}{\sin\alpha_0}\right)\end{array}\right\} = 0. \qquad (3.24)$$

Результаты расчетов $\overline{x_l}$ представлены на рис. 3.2. – 3.5.

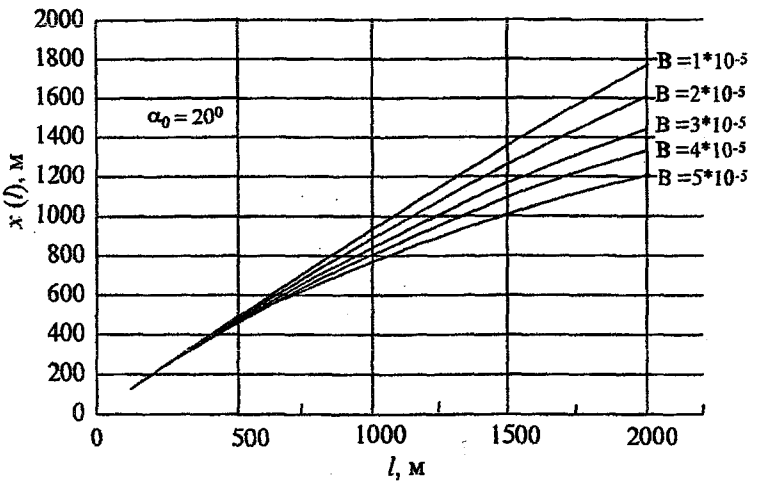


Рис. 3.2. График для определения абсциссы конца троса $\alpha_0 = 20°$

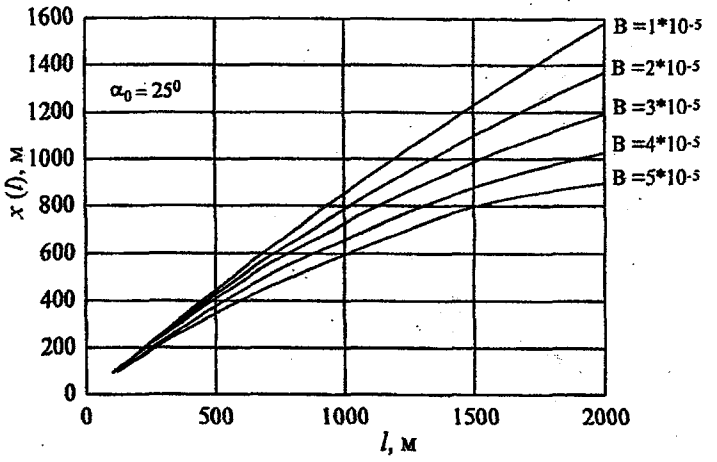


Рис. 3.3. График для определения абсциссы конца троса. $\alpha_0 = 25^\circ$

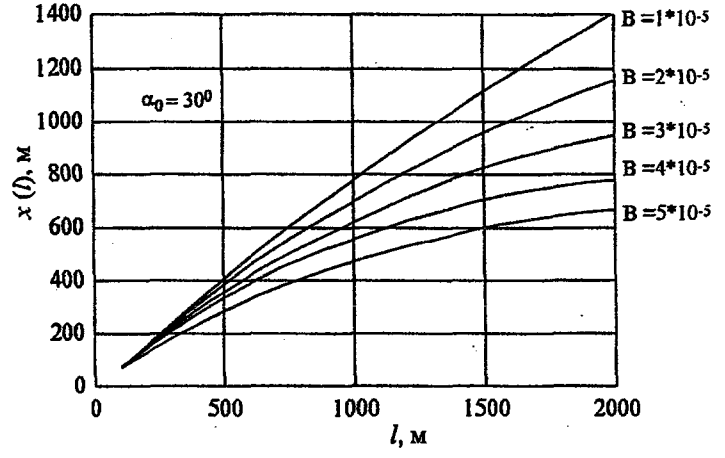


Рис. 3.4. График для определения абсциссы конца троса. $\alpha_0 = 30^\circ$

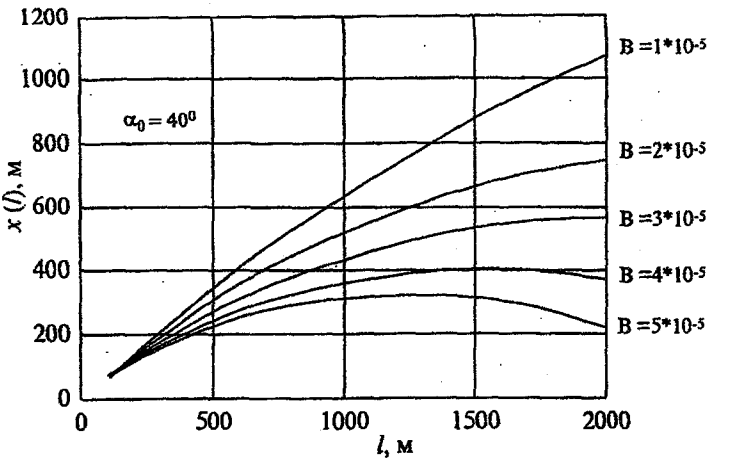


Рис. 3.5. График для определения абсциссы конца троса. $\alpha_0 = 40^\circ$

Подставив выражение (3.21) в уравнение (3.12) и проведя необходимые преобразования, получим расчетные выражения для нахождения зависимости $y = y(s)$:

$$y = \int \sqrt{1 - \left[A C_1 \sin(B C_1 s) + \sqrt{1 - A^2 C_1^2} \cos(B C_1 s) \right]^2} \, ds + C_3 \quad (3.25)$$

Этот интеграл легко вычисляется:

$$\begin{aligned} y &= \int \cos(B C_1 s + \arccos A C_1) \, ds + C_3 = \\ &= \frac{1}{B C_1} \sin(B C_1 s + \arccos A C_1) + C_3, \end{aligned} \quad (3.26)$$

Произвольная постоянная C_2 может быть найдена из условия при $s = 0 \quad y = 0$:

$$C_3 = -\frac{\sqrt{1 - A^2 C_1^2}}{BC_1}. \qquad (3.27)$$

Зависимость $\alpha = \alpha(s)$ может быть легко определена с помощью, например, формул (3.4), (3.26) и (3.27). Таким образом, задача оптимального проектирования кабель-троса решена полностью.

Распределение диаметра троса по его длине определим, подставив в формулу (3.9) выражение (3.20):

$$D = A - \frac{1}{C_1}\left\{AC_1\left[\cos(BC_1 s) - 1\right] + \sqrt{1 - A^2 C_1^2}\sin(BC_1 s)\right\} \qquad (3.28)$$

Результаты расчетов по этой формуле зависимости $D = D(s)$ для троса длиной $l = 500$ м, $B = 3 \cdot 10^{-5}$, $T_0 = 350$ кН, $\sigma_в = 700$ МПа, $\alpha_0 = 30°$ приведены на рис. 3.6.

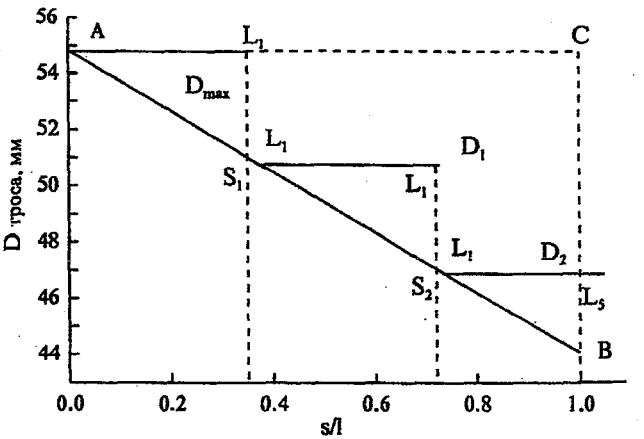


Рис. 3.6. Зависимость $D = D(s)$ (кривая AB)

После получения зависимости $D = D(s)$ возникает вопрос о возможности ее практического использования. Ясно, что при выполнении реальных буксировок невозможно для каждой отдельной буксировки создавать специальный трос, диаметр которого плавно

изменяется по длине троса в соответствии с полученным законом. Тем не менее, знание оптимального закона распределения диаметра по длине троса может быть эффективно использовано в практической деятельности.

Ранее уже упоминалось, что трос, удовлетворяющий условию равнопрочности, одновременно является и тросом с минимальным весом. Можно показать, что площадь под кривой *AB* рис. 3.6 пропорциональна минимально возможному весу тросовой системы. Хотя при решении задачи вес троса в воде не учитывался, снижение веса троса на воздухе является актуальной задачей. Эта задача может быть решена следующим образом.

На основании анализа плана предполагаемых буксировок определяется наиболее тяжелый режим. Для этого режима выполняется расчет оптимально троса и строится зависимость $D = D(s)$. Если выбрать для тросовой системы максимальный диаметр $D_{\max}$, то лишний вес этой системы по сравнению с оптимальной будет пропорционален площади фигуры *ABC* на рис. 3.6. Уменьшить этот вес можно, применив составной трос, состоящий из кусков разного диаметра. Диаметры и длина кусков составного троса должны быть определены из условия обеспечения минимальности веса. Любая тросовая система должна содержать кусок троса с диаметром $D_{\max}$. Это условие следует из принципа равнопрочности.

На рис 3.6 показана оптимизация тросовой системы, состоящей из 3-х кусков. Очевидно, что вес тросовой системы будет минимальным, если площадь *F* фигуры $CL_1L_2L_3L_4L_5$ будет максимальна. Запишем выражение для вычисления площади фигуры:

$$F = [D_{\max} - D_1(s_1)](l - s_1) + [D_1(s_1) - D_2(s_2)](l - s_2) \qquad .(3.29)$$

Это выражение можно рассматривать как функцию двух переменных $F = F(s_1, s_2)$. Условием наличия экстремума функции нескольких переменных является равенство нулю частных производных. Используя это условие, можно получить систему уравнений для нахождения s_1 и s_2.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial s_1} = -D_1'(s_1)(l - s_1) - [D_{max} - D_1(s_1)] + \\ \quad + D_1'(s_1)(l - s_2) = 0 \\ \dfrac{\partial F}{\partial s_2} = -D_2'(s_2)(l - s_2) - [D_1(s_1) - D_2(s_2)] = 0 \end{cases} \tag{3.30}$$

При подстановке формулы (3.28) в эту систему можно получить ее окончательный вид. Проще всего решение системы находить численными методами.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в таблице 3.1, варианты 0 –9.

Таблица 3.1

Величина	№ варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина троса, м	100	300	500	1000	1500	2000	300	500	1000	100
Усилие T_0, кН	350	500	600	300	350	400	200	250	270	300
α_0, град	20	25	30	40	30	25	20	25	30	40
Сопротивление троса на разрыв σ_B, МПа	700	600	550	650	700	600	550	650	700	600
$B \cdot 10^5$	1	2	3	4	5	4	3	2	1	3
Скорость буксировки, м/с	3	4	5	6	3	4	5	6	3	4
Коэффициент запаса n	1,5	2	2,5	3	1,5	2	2,5	3	2	2,5

Порядок выполнения работы

1. Рассчитываются значения постоянных B по формуле (3.9).
2. По графикам рис. 3.2 – 3.5 или по формуле (3.24) определяется значение $x(l)$.
3. По формуле (3.9) рассчитывается значение постоянной A.
4. По формуле (3.17) рассчитывается значение постоянной C_1.
5. По формулам (3.20) и (3.26) – (3.27) рассчитывается форма буксируемого троса. Расчет выполняется в точках $(0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1)l$.
6. Строится график зависимости $y = y(x)$.
7. В точках $(0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1)l$ по формуле (3.28) рассчитывается зависимость $D = D(s)$.
8. Строится график зависимости $D = D(s)$.

Составление отчета

В отчет о лабораторной работе входят:

1. Результаты расчетов.
2. График зависимости $y = y(x)$, показывающий форму троса при буксировке.
3. График зависимости $D = D(s)$. На нем наносится предполагаемое разбиение троса на три части. Разбиение выполняется "на глаз".
4. Анализ всех результатов лабораторной работы.

Лабораторная работа № 4

Расчет катодной и протекторной защиты подводной части сооружений

Литература

1. *Фархадов А.А.* Катодная защита от коррозии стальных сооружений в морской воде.– М.: Гостоптехиздат, 1962. – 250 с

2. *Хоникевич А.А.* Химия и коррозия в судостроении.– Л.: Судостроение, 1988. –224 с.

Общие пояснения

Подводная часть стальных морских инженерных сооружений (платформ, эстакад и т.п.) постоянно находится в коррозионно-активной среде – морской воде. В то же время подводная зона этих стационарных сооружений наиболее труднодоступна для ремонта и покраски. В этой зоне затруднен также контроль состояния металла и коррозионных разрушений. Подводные участки конструкций не могут быть надолго защищены покрытиями, так как со временем они разрушаются в морской воде. Любые восстановительные работы в подводной зоне морских инженерных сооружений сопряжены с большими трудностями и затратами, они возможны только при использовании специальных приспособлений и могут выполняться водолазами.

Поэтому защита подводной части морских инженерных сооружений должна быть независимой от положения и конфигурации элементов конструкции. Наиболее простым и легко осуществимым способом защиты подводных участков инженерных сооружений является электрохимическая защита катодная или протекторная.

Метод катодной защиты заключается в катодной поляризации защищаемой поверхности. Под катодной поляризацией понимают смещение потенциала катода в отрицательную сторону при прохождении катодного тока. В результате электрохимических реакций происходит постепенное растворение анода в морской воде. Для осуществления катодной защиты металлическая конструкция, подлежащая защите, подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока. Положительный же полюс источника со-

единяют с металлическим электродом (анодом) и помещают в морскую воду. Основным достоинством катодной защиты является долгий срок эксплуатации, позволяющий создать эффективную защиту от коррозии стационарных морских инженерных сооружений.

Сущность метода протекторной защиты заключается в присоединении к конструкции металла (протектора), имеющего более низкий электродный потенциал, нежели потенциал защищаемого металла. В морской воде в первую очередь происходит растворение металла, имеющего более низкий электродный потенциал. Таким образом, пока протектор не разрушится, он защищает поверхность конструкции. Основным достоинством протекторной защиты является ее независимость от внешнего источника тока, что позволяет ее использовать для защиты сооружений, не имеющих электроснабжения. Отрицательным качеством протекторной защиты является относительно короткий срок службы протектора.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Рассмотрим методику расчета катодной и протекторной защиты на примере морской эстакады. Эстакадами называются протяженные гидротехнические сооружения, имеющие связь с берегом, при этом буровые вышки и технологическое оборудование располагается на приэстакадных площадках. Опоры эстакад представляют собой свайные конструкции. Эстакады применяются при глубинах моря 6 –15 м, а в отдельных случаях на глубинах моря до 20 м.

Эстакада длиной 300 м, построена на сваях диаметром d_1 = 0.325 м при глубине моря 10 м. Количество свай 48 шт., а укосов 36 шт. Укосы выполнены из труб диаметром d_2 = 0.273 м (внутренняя поверхность труб не взаимодействует с морской водой). Длина укосов равна $l = 1.1h$, где h – глубина моря.

Расчет катодной защиты.

Расчет катодной защиты морского инженерного сооружения содержит следующие основные разделы:

1. Определение необходимого суммарного защитного тока и напряжения, обеспечивающего этот ток, исходя из размеров и количества свай эстакады (учету подлежат только конструкции, расположенные под водой).

2. Выбор материала и разработка конструкции анода.

3. Размещение анодов по защищаемому участку и определение срока службы анодов в зависимости от силы тока, проходящего через анод.

4. Электрический расчет катодной защиты.

5. Выбор оборудования катодной станции.

Определим суммарный защитный ток, необходимый для катодной защиты подводной части эстакады при величине защитной плотности тока $i = 0.15$ А/м^2.

Найдем площадь подводной поверхности сваи S_1 и подкоса S_2:

$$S_1 = \pi d_1 h = 3.14 \cdot 0.325 \cdot 10 = 10.2 \quad м^2;$$

$S_2 = 1.1\pi d_2 h = 1.1 \cdot 3.14 \cdot 0.273 \cdot 10 = 9.43 \quad м^2$. Общая сила тока для одного элемента конструкции будет: $I_1 = iS_1 = 0.15 \cdot 10.2 = 1.53\ A$; $I_2 = iS_2 = 0.15 \cdot 9.43 = 1.41\ A$.

Умножая полученные результаты на число свай и подкосов, определим величину суммарного защитного тока $I = 1.53 \cdot 48 + 1.41 \cdot 36 = 126\ A$.

В качестве анода для катодной защиты часто применяют куски железного лома, обрезки старых рельс, отработанные трубы различного диаметра, графитовые электроды большого размера, кругляки из железокремниевого сплава. Графитовые электроды и железокремниевые кругляки имеют малую растворимость при действии анодного тока. Однако графит обладает повышенной хрупкостью и может разрушаться на волнении, поэтому он используется реже. На практике часто используют различный металлический лом.

Аноды развешиваются в воде под эстакадой таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение токов и потенциалов по сваям и подкосам эстакад. На рис. 4.2 показано размещение анодов вдоль защищаемого участка эстакады, аноды располагаются через один пролет. В соответствии с рисунком для защиты эстакады необходимо 12 штук анодов.

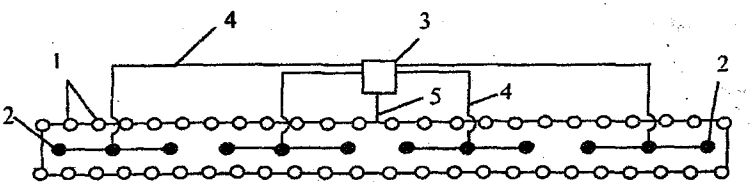


Рис. 4.1. Схема размещения анодов вдоль защищаемого участка эстакады (план)
1 – сваи эстакады; 2 – аноды; 3 – катодная станция; 4 – плюсовые кабели; 5 – минусовой кабель

Расчет времени службы стального и ферросилидового анодов можно выполнить по следующей формуле:

$$T = \eta \frac{m}{kI_a}.$$

Здесь T – срок службы анода в годах; m – масса анода, кг; k – коэффициент растворимости материала анода в морской воде, для стали он равен 10 кг/А, а для железокремниевого сплава – 035 кг/А в год; η = 0.75 – коэффициент использования анода. Сила тока, стекающая с одного анода $I_a = {I_\Sigma}/{n} = {126}/{12} = 10.5\ A$, где n – число анодов.

Массу анода рассчитаем, приняв, что он изготовлен из стальной трубы длиной 2.5 м и диаметром 0,325 м, толщина стенки трубы δ = 0,01 м:

$$m = \pi(D_1 - 2\delta)\delta l \rho = 3.14(0.325 - 2 \cdot 0.01)0.01 \cdot 2.5 \cdot 7.8 \cdot 10^3 187 \text{ кг}.$$

Здесь $\rho = 7.8 \cdot 10^3\ {\text{кг}}/{\text{м}^3}$ – плотность стали.

Срок службы анода будет равен:

$$T = 0.75 \frac{187}{10.5 \cdot 10} = 1.34 \quad \text{года}.$$

Для примера рассчитаем срок службы железокремниевого анода длиной 2 м, диаметром 0.1 м и массой 40 кг. Его срок службы будет:

$$T = 0.75\frac{40}{0.35 \cdot 10.5} = 8.2 \quad \text{года}.$$

Электрическая схема цепи катодной защиты представляет собой ряд последовательно соединенных сопротивлений. При расчете учитываются следующие сопротивления в порядке их расположения от положительного полюса источника тока (рис. 4.2).

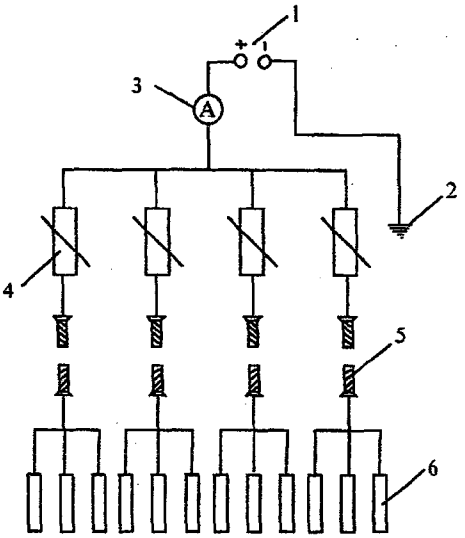


Рис. 4.2. Схема сопротивлений в цепи катодной защиты свай и подкосов эстакады в подводной зоне

1 – источник питания; 2 – заземление через защищаемую опору; 3 – амперметр; 4 – реостаты; 5 –подводные кабели; 6 – катодная защита.

Обычно напряжение источника тока задается. Для определения диапазона изменения сопротивления реостата необходимо знать величины падения напряжения в линиях и анодах.

Переходное сопротивление анод – вода может быть вычислено по формуле:

$$R = \frac{\mu}{2\pi l}\ln\frac{4l}{D_1} = \frac{0.6}{2\ \ 3.14\cdot 2.5}\ln\frac{4\cdot 2.5}{0.325} = 0.13\,\text{Ом},$$

где μ = 0.6 Ом·м – удельное сопротивление морской воды; l – длина анода, находящаяся в воде, равная 2.5 м; D_1 – наружный диаметр анода, равный 0.325 м. Как уже отмечалось, для защиты эстакады использовано 12 анодов. Тогда сопротивление одного анода будет $R_2 = R/12 = 0.011\,\text{Ом}$.

Падение напряжения на каждом фидере будет $\Delta U_2 = I_\Sigma R_2 = 126\cdot 0.011 = 1.38\,B$.

Для определения падения напряжения на линиях примем, что их длина l_1 равна 160 м, а сама линия изготовлена из медного провода, площадь сечения S которого составляет 25 мм^2. Тогда сопротивление линии можно рассчитать по известной формуле:

$$R_1 = \rho_1\frac{l_1}{S} = 1.7\cdot 10^{-8}\frac{160\cdot 4}{3.14\cdot 25\cdot 10^{6}} = 0.108\,\text{Ом}.$$

Здесь $\rho_1 = 1.7\cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление меди.

Падение напряжения на линии будет

$\Delta U_1 = \frac{I_\Sigma}{m}R_1 = \frac{126}{4}0.108 = 3.4$ В (m – число линий).

Задаваясь напряжением источника питания в 6 В, определим падение напряжения на реостате и максимальное значение сопротивления реостата:

$$\Delta U_3 = U - \Delta U_1 - \Delta U_2 = 6 - 3.4 - 1.38 = 1.22\,\text{В},$$

$$R_3 = \frac{\Delta U_3}{I_\Sigma}m = \frac{4}{126}1.22 = 0.038\,\text{Ом}.$$

Здесь R_1 – сопротивление соединительных проводов;

R_2 – переходное сопротивление анод – вода;

R_3 – сопротивление реостатов.

Протекторная защита

При расчете протекторной защиты исходят из величины защитной плотности тока и площади защищаемой поверхности. Действие протекторной защиты делится на два этапа. На первом этапе плотность тока должна быть достаточно большой (0.15–0.2 А/м^2). На этом этапе на защищаемой поверхности создается и наращивается защитный катодный осадок. На втором этапе, когда катодный осадок сформирован, плотность тока защиты должна составлять 0.03 А/м^2. Поэтому на первом этапе используют магниевые протекторы, которые обладают большой токоотдачей, а на втором этапе применяют алюминиевые протекторы.

Ток создаваемый одним протектором рассчитывается с помощью закона Киргофа:

$$\Delta\varphi = IR_{пр} + IR + IR_{соор},$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между сталью и протектором; $R_{пр}, R, R_{соор}$ – сопротивления протектора, каротажного провода и сооружения соответственно; I – ток в цепи протектора. Обычно ввиду малости $R_{соор}$ полагают равным нулю. Тогда ток, отдаваемый одним протектором, может быть найден из соотношения:

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R_{пр} + R}.$$

Величину сопротивления одного протектора, вертикально подвешенного на каротажном проводе к сооружению, можно определить по формуле, принятой для определения величины сопротивления при заземлении проводников:

$$R_{пр} = \frac{\mu}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d}.$$

Здесь μ – удельное сопротивление морской воды, равное 0,6 Ом·м; l – длина протектора, м; d – диаметр протектора, м

Сопротивление каротажного провода находится из соотношения: 10 м провода имеют сопротивление 0.1 Ом.

Число протекторов n необходимое для защиты подводной части сооружения определяют как отношение необходимого суммарного тока к токоотдаче одного протектора:

$$n = \frac{I_\Sigma}{I}.$$

Необходимая суммарная сила тока защиты будет

$$I_\Sigma = SI_d,$$

где S – величина защищаемой поверхности в м^2; I_d - плотность защитного тока в А/м^2.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 4.1 – 4.3, варианты 0 – 9.

Таблица 4.1

Геометрические характеристики эстакады

№ варианта	Количество свай	Диаметр сваи, м	Количество подкосов	Диаметр подкоса, м	Глубина воды, м
0	48	0,4	24	0,2	12
1	42	0,35	21	0,22	11
2	36	0,35	20	0,24	10
3	30	0,4	30	0,3	9
4	36	0,25	28	0,27	8
5	42	0,3	30	0,25	7
6	48	0,35	36	0,24	11
7	54	0,4	42	0,17	13
8	48	0,37	24	0,16	10
9	42	0,41	34	0,21	12

Таблица 4.2

Данные для расчета протекторной защиты эстакады

№ варианта	$\Delta\varphi$, В	Длина протектора, м	Диаметр протектора, м	Плотность защитного тока, А/м^2	
				1 этап	2 этап
0	0,2	0,6	0,12	0,15	0,03
1	0,2	0,65	0,12	0,16	0,035
2	0,2	0,7	0,1	0,17	0,033
3	0,25	0,66	0,11	0,18	0,031
4	0,25	0,68	0,12	0,19	0,032
5	0,25	0,65	0,1	0,2	0,03
6	0,18	0,6	0,11	0,19	0,035
7	0,18	0,7	0,13	0,18	0,033
8	0,2	0,75	0,12	0,15	0,034
9	0,2	0,58	0,11	0,17	0,03

Таблица 4.3

Данные для расчета катодной защиты

№ варианта	Плотность защитного тока, А/м2	Коэффициент использования анода	Длина анода, м	Диаметр анода, м	Толщина стенки анода, м	Длина электрической линии анода, м	Площадь поперечного сечения медного провода линии, мм^2	Напряжение источника питания, В
0	0,15	0,75	3	0,4	0,01	200	25	8
1	0,15	0,77	2,9	0,35	0,01	180	26	8
2	0,15	0,79	2,8	0,35	0,01	160	24	7
3	0,15	0,81	2,6	0,4	0,01	140	22	7
4	0,17	0,73	2,5	0,25	0,007	120	25	6
5	0,17	0,71	2,4	0,3	0,008	100	25	6
6	0,17	0,68	2,3	0,35	0,01	120	23	6
7	0,17	0,7	2,2	0,4	0,01	140	21	7
8	0,14	0,72	2	0,37	0,01	160	26	8
9	0,14	0,74	2,5	0,41	0,01	180	25	8

Порядок выполнения работы

1. На основании исходных данных рассчитывается площадь подводной поверхности защищаемого сооружения.
2. Рассчитывается величина суммарного защитного тока при катодной защите сооружения.
3. Рассчитывается срок службы стального анода.

4. Выполняется электрический расчет катодной защиты и определяется сопротивление реостата.

5. Рассчитывается сопротивление протектора.

6. Определяется сопротивление каротажного провода.

7. Определяется ток, отдаваемый одним протектором.

8. Вычисляется число протекторов, необходимых для защиты сооружения на первом и втором этапах защиты.

Составление отчета

В отчет о лабораторной работе входя:

1. Результаты расчетов катодной защиты эстакады.
2. Результаты расчетов протекторной защиты эстакады
3. Анализ всех результатов лабораторной работы.

Лабораторная работа № 5

Расчетное определение пределов прочности льда

Литература

1. *Гладков М.Г., Петров Г.И., Федоров Б.А.* Схема расчета предела прочности льда. – Труды ААНИИ, т.379, 1983, с.75–88.

2. Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий. Под ред. И.Е. Фролова и В.П. Гаврило.– СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. – 402 с.

Общие пояснения

При осуществлении хозяйственной деятельности в полярных регионах часто возникает необходимость получения информации о прочностных свойствах льда. Получение этой информации традиционным путем с помощью проведения механических испытаний не всегда возможно, так как требует больших временных затрат. Кроме этого для выполнения механических испытаний необходимо иметь специальное оборудование, обеспечивающее их выполнение. Поэтому для получения оперативных оценок прочностных свойств льда используют различные косвенные измерения. Следует подчеркнуть, что такими способами можно получить лишь оценки средних величин значений пределов прочности. Подобные методики на содержат информации о случайной изменчивости пределов прочности льда.

Данные многолетних исследований показывают, предел прочности льда для любого типа деформации (сжатие, изгиб и срез) определяется следующими параметрами:

– соленостью льда S_l, ‰;

– температурой льда t_l, °С;

– структурой льда;

– плотностью льда, кг/м^3;

– размерами образца.

На результаты определения пределов прочности льда существенное влияние оказывают условия проведения эксперимента. К ним обычно относят:

– свойства среды, в которой находится испытываемый образец льда;

– направление приложения нагрузки относительно ориентации основных структурных элементов льда (кристаллов, блоков кристаллов, рассолосодержащих каналов, воздушных полостей);

– скорость нагружения образцов льда.

Для учета всех этих факторов при определении пределов прочности льда применяют математические выражения, имеющие следующую структуру:

$$\sigma = \overline{\sigma}\left(t_l, S_l\right) abcdf, \qquad (5.1)$$

где $\overline{\sigma}\left(t_l, S_l\right)$ – обобщенный предел прочности льда при заданном виде деформации, зависящий от температуры льда и его солености; *a, b, c, d* и *f* – поправки, учитывающие влияние структуры льда (*a*), плотности льда (*b*), свойств среды (*c*), направления приложенной к образцу нагрузки (*d*) и скорости нагружения образца (*f*). Данные, на основе которых находятся зависимости $\overline{\sigma}\left(t_l, S_l\right)$, получают путем испытаний малых образцов льда.

В общем виде расчетную схему, базирующуюся на соотношении (5.1) можно представить следующим образом.

1. По семейству графиков, полученных при обобщении экспериментальных данных и отражающих зависимость пределов прочности малого образца льда от типа деформации, температуры и солености, находится обобщенный предел прочности льда $\overline{\sigma}\left(t_l, S_l\right)$.

2. В полученное значение вводятся поправки, учитывающие влияние структуры льда, его плотности, свойств среды, направления приложения к образцу нагрузки и скорости нагружения.

3. Вычисление пределов прочности образцов льда, имеющих размеры отличные от малых образцов.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Сотрудником ААНИИ Н.В. Черепановым была разработана структурно-генетическая классификация льда по условиям его образования и солености воды. Льды природных водоемов подразделяются на четыре основные группы:

– группа "А" – льды, образующиеся из пресной или сильно распресненной воды соленостью менее 2 ‰;

– группа "Б" – льды, образующиеся в распресненной воде соленостью от 2 до 24.7 ‰;

– группа "В" – льды, образующиеся в морской воде соленостью более 24.7 ‰;

– группа "Г" – льды, претерпевшие термические преобразования в процессе своего существования.

Различные типы льдов, принадлежащих одной группе, имеют различный числовой индекс, который показывает степень динамичности условий ледообразования. Чем выше индекс, тем динамичнее условия. В табл/ 5.1 представлена взаимосвязь различных видов ледообразования с формированием определенных структурно генетических типов льда. Основные типы пресноводных и морских льдов представлены на рис. 5.1 и 5.2. Более подробное их описание изложено в справочном пособии [2].

Таблица 5.1

Виды ледообразования и формирование структурно-генетических типов льда

Вид ледообразования	Конжеляционное	Конжеляционно-внутриводное	Внутриводно-шуговое	Инфильтрационное	Вторично-рекристаллизационное
Тип льда	А1, А2, А3, А4, Б1, Б2, Б3, Б4, В1, В2, В3	А5. А6, Б5, Б6, В4, В5, В6	А7, А8, Б7, Б8, В7, В8	А9, Б9, В9	Г1, Г2, Г3, Г4

Далее при рассмотрении влияния структуры льда на его прочностные характеристики все расчетные данные будут приводится для двух наиболее распространенных групп льда, а именно для групп "А" и "В". В первом приближении расчетные данные для группы "Б" могут быть получены как среднее значение между соответствующими значениями групп "А" и "В".

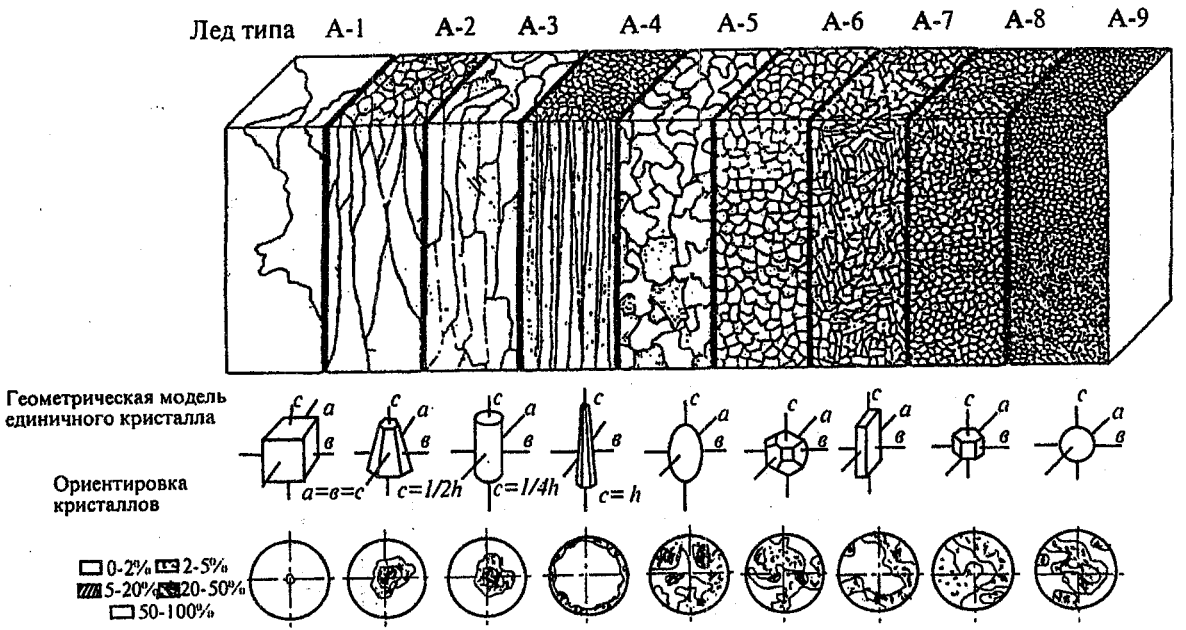


Рис. 5.1. Основные типы пресноводных льдов (группа "А")

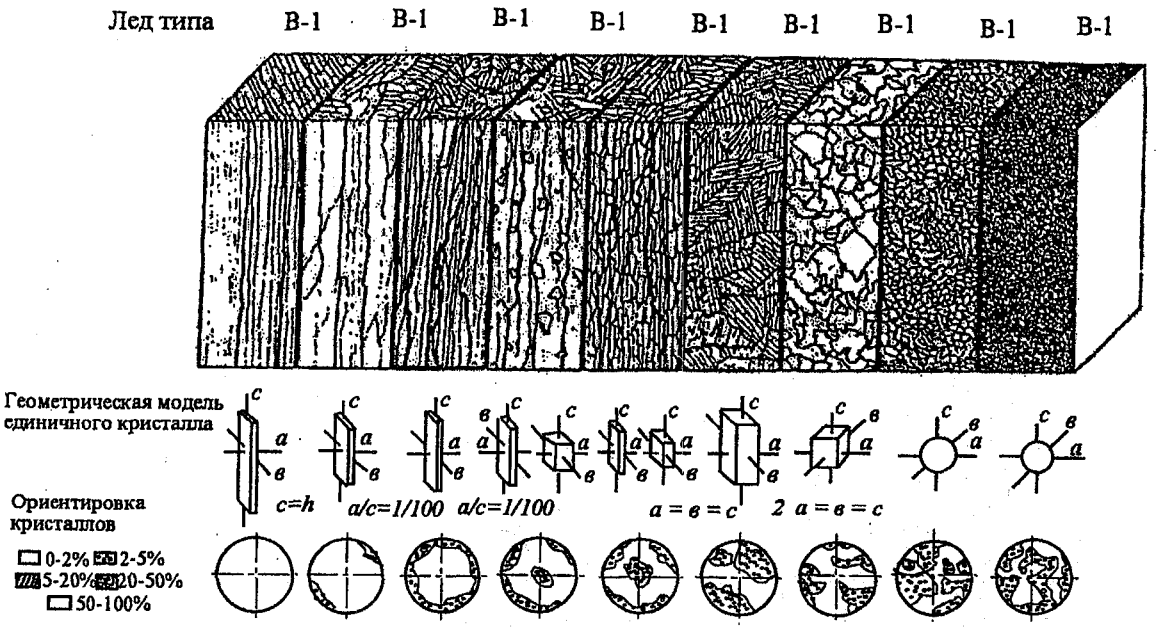


Рис. 5.2. Основные типы морских льдов (группа "В")

При определение пределов прочности льда с помощью соотношения (5.1) учет структуры льда осуществляется с помощью безразмерного коэффициента *a*. Значения этого коэффициента приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Значения коэффициента *a*, учитывающего структуру льда

Класс льда	Структура и тип льда	Значения *a* для разных типов деформации		
		сжатие	изгиб	срез
Пресноводный	Призматическая А1, А2	1.5	1.6	-
	Шестовато-игольчатая А3, А4	1.0	1.0	1.0
	Зернистая А6, А7, А8, А9	0.5	0.5	-
Морской	Волокнистая крупноагрегатная В1	1.3	1.1	1.6
	Волокнистая В2, В3, В4	1.0	1.0	1.0
	Волокнистая В5	1.0	0.8	1.0
	Зернистая В6, В7, В8, В9	0.5	0.5	0.9

Влияние плотности льда на его прочностные свойства описываются коэффициентом *b*, значения которого представлены в табл/ 5.3.

Таблица 5.3

Значения коэффициента *b*, учитывающего плотность льда

Плотность льда, кг/м^3	Значения *b* для разных типов деформации			
	для воздушных полостей сферической формы		для воздушных полостей цилиндрической формы	
	сжатие и срез	изгиб	сжатие и срез	изгиб
917	1.0	1.0	1.0	1.0
900	0.99	0.98	0.92	0.85
875	0.97	0.95	0.86	0.76
850	0.95	0.92	0.81	0.7
800	0.91	0.87	0.73	0.59
750	0.87	0.82	0.67	0.52

Значение коэффициента *c*, учитывающего влияние среды, окружающей образец, на его прочностные свойства не зависит от вида деформации образца. Величина этого коэффициента при проведении

испытаний на воздухе равна $c = 1$, а при проведении испытаний в воде $c = 0.8$.

Значения безразмерных коэффициентов d и f зависят от вида деформации образца, поэтому данные для нахождения этих коэффициентов будут приведены ниже при рассмотрении методик расчета пределов прочности льда.

Расчет пределов прочности образцов льда при сжатии

1. По семейству графиков, представленных на рис. 5.3, определяется $\overline{\sigma}_c(t_l, S_l)$ при заданных температуре и солености льда. Полученный результат относится к малому образцу размером $0{,}05 \times 0{,}05 \times 0{,}05$ м.

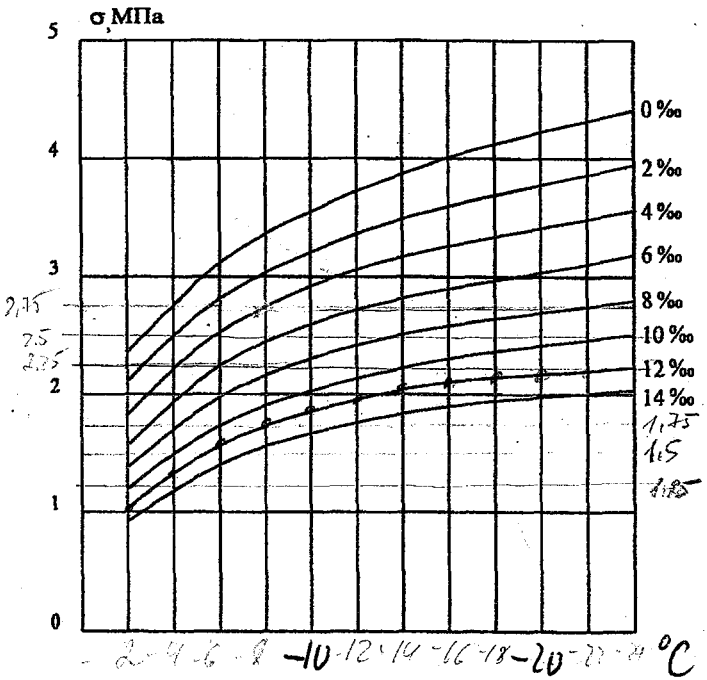


Рис. 5.3. Зависимость обобщенного предела прочности малых образцов льда на сжатие от его температуры и солености

1. Определяются значения поправочных коэффициентов в выражении (5.1). Значения коэффициентов *a, b, c* приведены в табл. 5.2 и 5.3. Величины коэффициентов *d* и *f* определяются из табл. 5.4 и рис. 5.4.

Таблица 5.4

Значения коэффициента *d*, учитывающего направление приложения нагрузки относительно ориентации основных структурных элементов льда при сжатии и срезе

Направление приложения нагрузки ко льду	Значения *d*
Перпендикулярно граням образца, параллельным поверхности ледяного покрова, из которого образец взят (вдоль длинных осей структурных элементов льда)	1.2
Параллельно граням образца, параллельным поверхности ледяного покрова, из которого образец взят (перпендикулярно длинным осям структурных элементов льда)	0.8
Параллельно или перпендикулярно граням образца, параллельным поверхности ледяного покрова, из которого образец взят (безразлично по отношению к структурным элементам изотропного льда). Для пресноводных и морских льдов зернистой структуры (А6, А7, А8, А9, В6, В7, В8, В9.	1.0

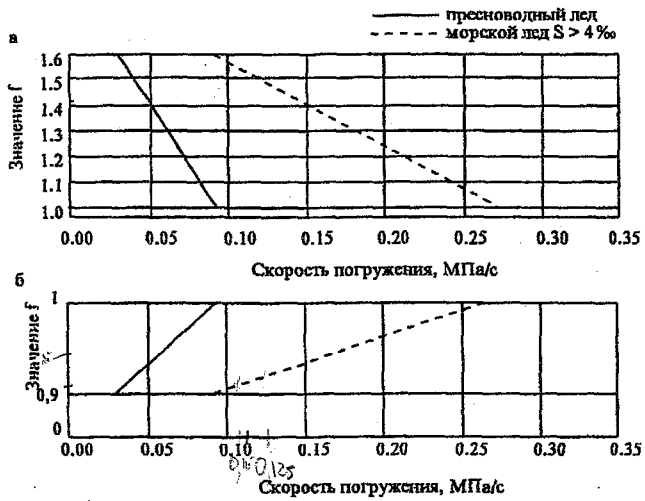


Рис. 5.4. Значения коэффициента *f*, учитывающего скорость нагружения образцов при сжатии.

а – при приложении нагрузки вдоль структурных элементов льда; *б* – при приложении нагрузки перпендикулярно структурным элементам льда

3. Значение предела прочности льда на сжатие σ_{c1} для образца кубической формы с размером ребра L_1 из интервала $0.05\text{ м} < L_1 \le 0.25\text{ м}$ может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\sigma_{c1} = \sigma_c \sqrt{\frac{L_0}{L_1}}, \qquad (5.2)$$

где σ_c – значение предела прочности, рассчитанное по формуле (5.1), $L_0 = 0.05\text{ м}$ – длина ребра малого образца.

Значение предела прочности льда на сжатие σ_{c2} для образца кубической формы с размером ребра L_1 из интервала $0.25\text{ м} < L_2 \le 0.5\text{ м}$ может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\sigma_{c2} = \sigma_c \sqrt[3]{\frac{L_1}{L_2}}, \qquad (5.3)$$

где $L_1 = 0.25\text{ м}$.

Формулы (5.2) и (5.3) описывают так называемый масштабный эффект предела прочности льда на сжатие, выражающийся в том, что прочность на сжатие уменьшается при увеличении размера разрушаемого образца льда.

Расчет предела прочности льда при изгибе

1. По семейству графиков, представленных на рис. 5.5, определяется $\overline{\sigma}_f(t_l, S_l)$ при заданных температуре и солености льда. Полученный результат относиться к малому образцу – балке размером $0{,}04 \times 0{,}04 \times 0{,}34$ м. Балки для проведения испытаний выбирались из ледяного покрова таким образом, чтобы их длинные ребра были параллельны поверхности льда. Разрушение балки осуществлялось по двух опорной схеме, в которой нагрузка прикладывается в точке равноудаленной от опор.

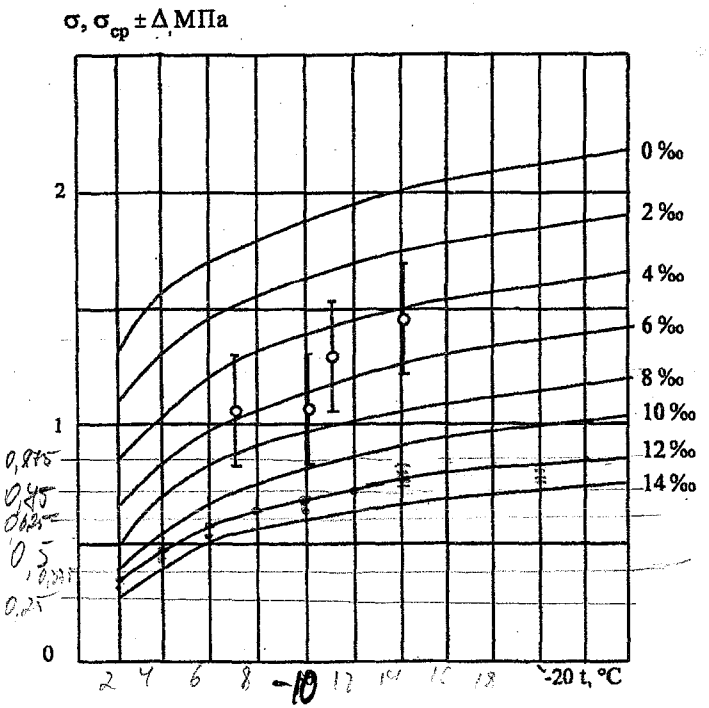


Рис. 5.5. Зависимости обобщенного предела прочности льда на изгиб от температуры льда и его солености

1. Определяются значения поправочных коэффициентов в выражении (5.1). Значения коэффициентов *a, b, c* приведены в табл. 5.2 и 5.3. Значение коэффициента *d*, учитывающего направление приложения нагрузки относительно ориентации основных структурных элементов балки для данных, приведенных на рис. 5.5, следует принимать равным 1. Значение коэффициента *f* по графику, представленному на рис. 5.6.

Рис. 5.6. Зависимость коэффициента f от скорости нагружения образца

3. Значение предела прочности σ_{f_1} балок квадратного сечения произвольной длины L_1 может быть найдено по формуле:

$$\sigma_{f1} = \sigma_f \sqrt{\frac{L_0}{L_1}}, \qquad (5.4)$$

где σ_f – значение предела прочности, рассчитанное по формуле (5.1), $L_0 = 0.34$ м – длина малой балки, сторона сечения балки при этом задается выражением $L_1 = 8.5b$.

Расчет предела прочности при сдвиге

1. По семейству графиков, представленных на рис. 5.7, определяется $\overline{\sigma}_\tau(t_l, S_l)$ при заданных температуре и солености льда.

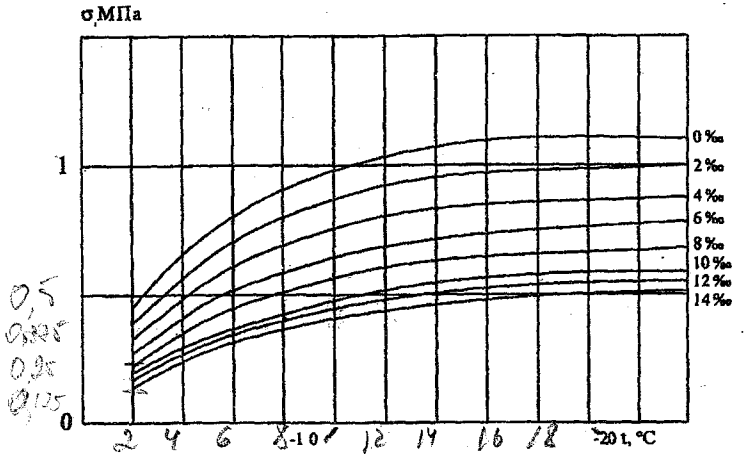


Рис. 5.7. Зависимости обобщенного предела прочности льда при срезе от температуры льда и его солености

1. Определяются значения поправочных коэффициентов в выражении (5.1). Значения коэффициентов *a, b, c* и *d* приведены в табл. 5.2, 5.3 и 5.4. Значение коэффициента *f*, учитывающего скорость возрастания нагрузки, следует принимать равным 1.

2. В настоящее время фактических данных, характеризующих изменение предела прочности льда при срезе с изменением размеров образцов нет.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 5.5, варианты 0 – 9.

Таблица 5.5

Исходные данные для выполнения работы

Характеристика льда	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип льда	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	A4
Диапазон изменения температуры льда, °C	от –2 до –20 (шаг 2 °C)									
Соленость льда, ‰	14	12	10	8	6	4	6	8	4	1

Плотность льда, кг/м³		910	900	870	880	850	820	840	910	890	850
Форма воздушных включений		сф.	цил.	сф.	цил.	сф.	цил.	сф.	цил.	сф.	цил.
Среда, в которой проводятся испытания		возд.	вода	возд.	вода	возд	вода	возд	вода	возд	вода
Направление приложения нагрузки		‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥	‖	⊥
Скорость приложения нагрузки, МПа/с	сжатие	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,2	0,28	0,27	0,04
	изгиб	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,5	1	2	2,5	0,04
n		2	3	4	5	4	3	2	3	4	4

Пояснения к таблице:

– сф. – сферические, цил. – цилиндрические;

– возд. – воздух;

– ‖ – нагрузка приложена параллельно граням, параллельным поверхности ледяного покрова; ⊥ – нагрузка приложена перпендикулярно граням, параллельным поверхности ледяного покрова;

– *n* – число, которое показывает, во сколько раз необходимо увеличить размер расчетного образца по сравнению с малым образцом.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать величины пределов прочности льда для заданного диапазона изменения температуры. Расчет выполняется на основании выражения (5.1). Значения поправочных коэффициентов определяются по приведенным в работе графикам и таблицам в соответствии с исходными данными.

2. Построить графики зависимости пределов прочности льда от температуры $\sigma_c = f(t), \sigma_f = f(t), \sigma_\tau = f(t)$.

3. Строятся графики, иллюстрирующие взаимосвязь различных пределов прочности льда. Для построения этих графиков из зависимостей $\sigma_c = f(t), \sigma_f = f(t), \sigma_\tau = f(t)$ исключается температура. В результате строятся два графика $\sigma_c = g(\sigma_f)$ и $\sigma_\tau = g(\sigma_f)$.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1. Графики зависимостей $\sigma_c = f(t), \sigma_f = f(t), \sigma_\tau = f(t)$, $\sigma_c = g(\sigma_f)$ и $\sigma_\tau = g(\sigma_f)$;

2. Анализ полученных результатов.

Лабораторная работа № 6

Определение прочностных характеристик моделированного морского льда

Литература

1. *Степанюк И.А.* Технологии испытаний и моделирования морского льда.– СПб: Гидрометеоиздат, 2001. – 78 с.

2. *Алексеев Ю.Н., Карулина М.М.* Метод определения прочности льда на изгиб / Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. 8 (292), 1998, с.72–78.

Общие пояснения

В настоящее время основным средством изучения взаимодействия судов и шельфовых инженерных сооружений со льдом являются ледовый опытовые бассейны, в которых моделируется ледяной покров. Трудами российских и зарубежных ученых и инженеров разработана теория моделирования льда и предложены технологические схемы его намораживания в ледовых бассейнах. Основным выводом из теории моделирования льда стало требование снижения прочности льда в модельных условиях в масштаб раз. Другими словами, прочность льда должна быть уменьшена во столько же раз, во сколько модель меньше реального объекта.

Другим требованием, вытекающим из теории моделирования, является постоянство относительной деформации льда:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \text{const}. \qquad (6.1)$$

Здесь σ – предел прочности; E – модуль Юнга льда.

Современное состояние технологий намораживания моделированного льда в ледовых бассейнах позволяет уверенно моделировать только одну характеристику прочности морского льда – предел прочности на изгиб. Пределы же прочности на сжатие и срез не моделируются, а их значения могут только фиксироваться при проведении испытаний.

Точно также в ледовых бассейнах плохо моделируется модуль Юнга льда. Однако почти полувековой опыт работы ледовых бассейнов показал, что требование (6.1) не является очень жестким. Если отношение E/σ превышает 2000, то неточное моделирование модуля Юнга не влияет на результаты эксперимента. Таким образом, при выполнении экспериментов в ледовых бассейнах наибольшее внимание уделяется моделированию предела прочности льда на изгиб.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

После намораживания ледового поля в каждом ледовом бассейне проводят контроль получившихся физико-механических свойств льда. К стандартным испытаниям обычно относятся:

– определение прочности льда на изгиб;
– определение модуля Юнга льда;
– определение плотности льда;
– определение коэффициента трения льда по поверхности модели.

Кроме этого могут проводиться специальные измерения для определения прочности льда на сжатие, механических характеристик моделированных торосов, трещиностойкости льда.

Обычно для определения прочности льда на изгиб используется разрушение на плаву консольных балок. Для выполнения этих измерений из моделированного ледяного покрова вырезают 4 –6 консольных балок, которые затем нагружают сосредоточенной силой. При испытаниях фиксируется изменение во времени усилия, разрушающего балку. Типичная зависимость усилия от времени показана на рис. 6.1.

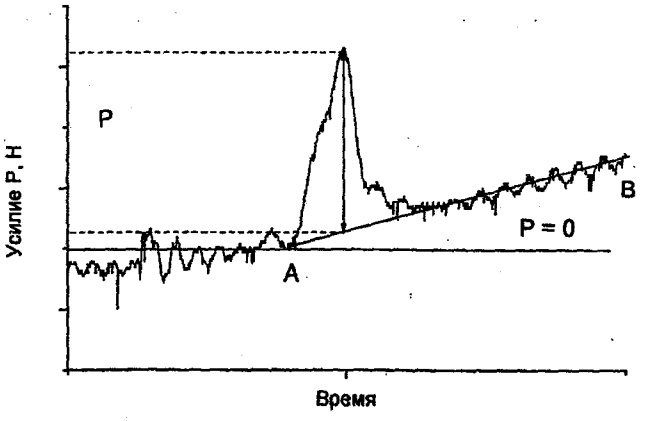


Рис. 6.1. Зависимость усилия, разрушающего консольную балку, от времени

После разрушения всех балок определяются их геометрические размеры ширина, длина и толщина. Предел прочности σ_f вычисляется по формуле:

$$\sigma_f = \frac{6Pl}{bh_l^2}, \qquad (6.2)$$

где P – максимальное значение усилия, H; l, b, h_l – длина, ширина и толщина балки соответственно.

На рис. 6.1 показана также процедура определения величины разрушающего балку усилия **P**. Как следует из этого рисунка, характер изменения разрушающего усилия во времени имеет особенности. Явно выделяется пик – зона резкого возрастания усилия в момент разрушения балки. После разрушения балки усилие уменьшается, но не до нулевого значения, а до некоторой конечной величины. Затем усилие плавно начинает возрастать, правда, с существенно меньшей скоростью, чем при разрушении балки. Такое поведение усилия объясняется плавучестью льда. По мере нагружения балки происходит ее притапливание, вызывающее увеличение архимедовой силы, которая

создает сопротивление изгибу балки. Приближенно изменение во времени архимедовой силы описывается прямой **АВ**, показанной на рис. 6.1. Поэтому величину усилия **Р**, затраченного на разрушение консольной балки, определяют не по отношению к нулевому уровню нагрузки, а отсчитывают от прямой **АВ**. Таким образом, сразу же исключается влияние увеличения сил плавучести на результат определения силы **Р**.

Описанная выше обработка применяется к каждой сломанной в процессе проведения испытаний консольной балке. По результатам расчетов определяется среднее значение прочности льда на изгиб, которое и принимается в качестве конечного результата испытаний, если полученные экспериментальные данные удовлетворяют критерию Шовене.

Критерий Шовене, так же как и критерий Стьюдента, применяется для удаления из совокупности экспериментальных данных грубых ошибок. Для применения критерия Шовене необходимо на основе экспериментальных данных определить среднее значение $\bar{x}$ и среднеквадратичное отклонение, которое рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}}, \qquad (6.3)$$

где n – число данных.

Далее из табл. 6.1 по известному числу данных находят отношение максимально допустимого отклонения к среднеквадратичному отклонению $\Delta\max/\sigma$.

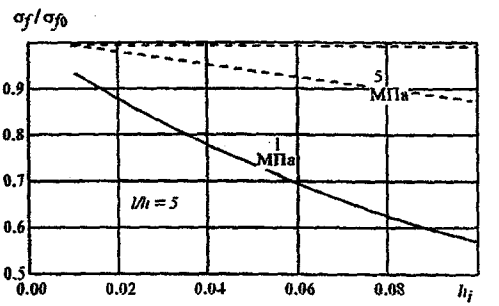
Таблица 6.1

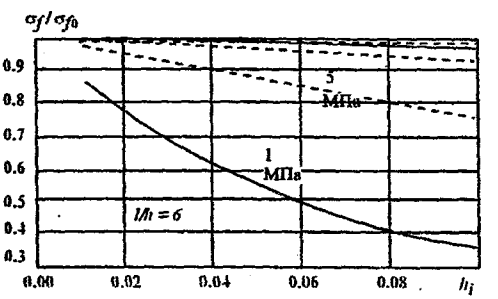
Критерий Шовене

Число данных n	4	5	6	10	15	25	50	100	300
$\Delta\max/\sigma$	1.54	1.65	1.73	1.96	2.13	2.33	2.57	2.81	3.14

Если какое-либо экспериментальное данное находится вне полосы $\bar{x} \pm \Delta max$, то оно должно быть отброшено, а среднее значение пересчитано.

При определении прочности льда на изгиб предполагается, что в заделке консольная балка жестко защемлена. Другими словами, принято считать, что в заделке консольной балки отсутствует прогиб и угол поворота сечения. На самом деле это предположение не совсем соответствует действительности. В ледовом бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова были проведены специальные эксперименты и выполнены теоретические расчеты по определению влияния указанных факторов на величину получаемых в опытах прочностных характеристик льда. Результаты этих исследований представлены в виде графиков на рис. 6.2. На этих графиках σ_{f0} – значение прочности, рассчитанное по формуле (6.2).





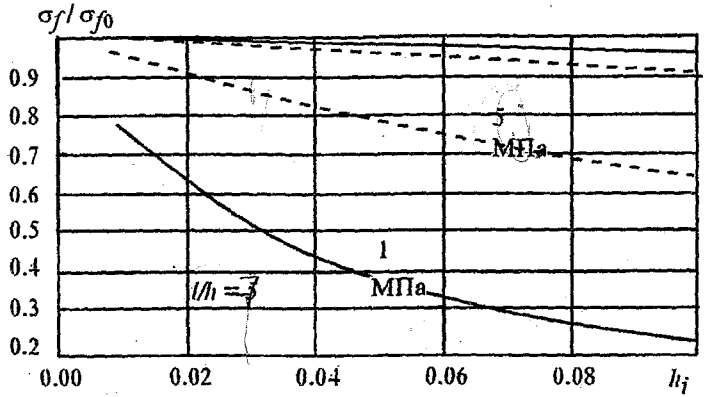


Рис. 6.2. Значение поправочного коэффициента $\frac{\sigma_f}{\sigma_{f0}}$ в зависимости от толщины льда, отношения l / h_I и модуля Юнга

После намораживания каждого ледяного поля в ледовом опытовом бассейне осуществляют измерение модуля упругости полученного льда. Определение модуля упругости базируется на классическом решении Герца задачи о центральном изгибе упругой пластины, лежащей на упругом основании.

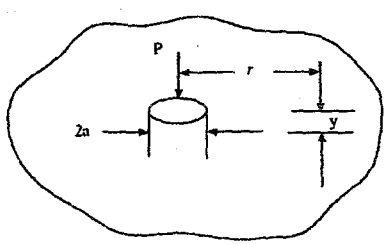


Рис. 6.3. Схема нагружения ледяного поля и измерения его прогиба при определении модуля Юнга льда. *У* – прогиб ледяной пластины

В общем случае измерения выполняются по следующей схеме (рис. 6.3). Неразрушенный ледяной покров нагружается сосредоточенной силой **P**. На самом деле, приложить сосредоточенную силу к ледяному покрову невозможно, поэтому нагрузку прикладывают в

пределах круга радиусом a. Теперь, если измерить прогиб пластины на некотором расстоянии от места приложения нагрузки r, то по полученным данным может быть определен модуль Юнга. В этом случае модуль Юнга находится из решения следующего уравнения:

$$\pi a^2 \rho_w g \frac{P}{y} = \frac{a}{l_c}\left[ber'\left(\frac{a}{l_c}\right)her\left(\frac{r}{l_c}\right) - bei'\left(\frac{a}{l_c}\right)hei\left(\frac{r}{l_c}\right)\right], \qquad (6.4)$$

где y – прогиб ледяной пластины, м; ρ_w – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения; ber', her, bei', hei – модифицированные функции Бесселя, называемые функциями Кельвина; l_c – характеристическая длина изгиба пластины, лежащей на упругом основании

$$l_c = \sqrt[4]{\frac{D}{\rho_w g}}, \qquad (6.5)$$

здесь $D = \frac{Eh_l^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость ледяной пластины, H·м; h_l – толщина ледяного покрова, м; ν – коэффициент Пуассона льда, эта величина для льда достаточно стабильна и ее можно принимать равной 0,33.

Расчетное выражение (6.4) можно существенно упростить, если создать экспериментальную установку для определения модуля Юнга льда, в которой измерение прогиба пластины осуществляется в точке приложения сосредоточенной силы (в центре круга радиуса a). В этом случае модуль Юнга рассчитывается по простой формуле:

$$E = \frac{3(1-\nu^2)}{16\rho_w g h_l^3}\left(\frac{P}{y}\right)^2. \qquad (6.6)$$

В практике работы ледового бассейна измерение модуля Юнга осуществляют следующим образом. К неразрушенному ледяному покрову последовательно прикладывается нагрузка 2, 5 и 10 Н. Часто при проведении испытаний используют только две последние нагруз-

ки. При этом осуществляется непрерывная запись прогибов льда. В результате получают зависимость прогиба льда от времени. Типичная зависимость приведена на рис. 6.4. На этом же рисунке показана процедура определения прогибов ледяного покрова при различных нагрузках.

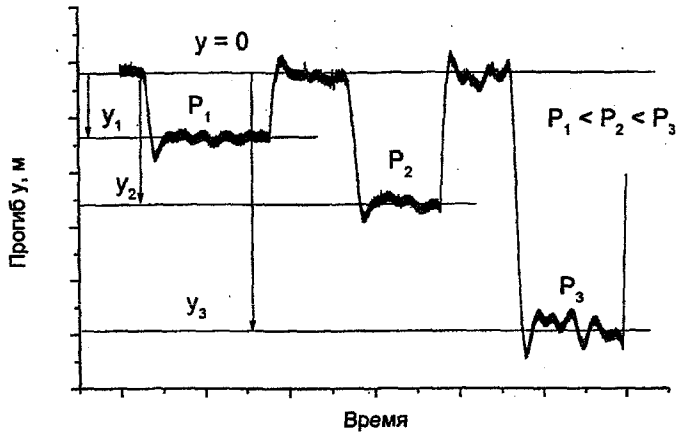


Рис. 6.4. Методика определения прогибов ледяной пластины при действии нагрузки

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 6.2 и 6.3, варианты 0–9. В табл. 6.2. приведены результаты испытаний ледяных консольных балок на изгиб. В табл. 6.3. содержатся исходные данные для нахождения модуля Юнга льда. При определении модуля Юнга лед нагружался силой в 5 и 10 Н.

В табл. 6.2 и 6.3 приведены данные полученные в ледовом опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова при выполнении исследовательских работ. В качестве данных для лабораторной работы отбирались наиболее удачные эксперименты, поэтому получаемые при выполнении работы значения прочности льда на изгиб и модуля Юнга относятся к разным ледовым полям.

Таблица 6.2.

Усилие, которым нагружается консольная балка, *H*

№ варианта		0				1				2				3				4			
l, мм		292	271	285	236	220	222	234	238	250	255	291	273	284	239	217	220	236	240	236	240
b, мм		109	107	110	111	96	96	97	95	112	98	110	111	112	109	98	99	98	97	97	92
h_1, мм		22	32	31	31	30	30	29	29	32	32	33	33	32	32	31	31	30	30	29	28
Время, с.	0	0	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07
	0.1	0.02	0	0.02	0	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08	0.02	0	0.02	0	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08
	0.2	0.02	0.02	0	0	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.02	0.02	0	0	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07
	0.3	0	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.04	0.09	0.08	0.10	0	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.04	0.02	0.08	0.10
	0.4	0	0	0.07	0.02	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	0.10	0	0	0.07	0.02	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	0.10
	0.5	0	0	0.02	0.05	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07	0	0	0.02	0.05	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07
	0.6	0.03	0.02	0.04	0	0.07	0.07	0.06	0.10	0.08	0.06	0.03	0.02	0.04	0	0.07	0.07	0.06	0.10	0.08	0.06
	0.7	0	0	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.16	0.07	0.07	0	0	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.16	0.07	0.07
	0.8	1.00	0	0.44	1.07	0.09	2.71	0.08	0.37	0.07	0.05	1.05	0	0.46	1.13	0.09	2.85	0.08	0.40	0.07	0.05
	0.9	1.57	0.01	1.11	1.62	1.96	0.74	2.52	3.23	0.07	0.07	1.64	0.01	1.16	1.70	3.06	0.78	2.64	3.39	0.07	0.07
	1.0	2.16	0.55	1.84	2.13	3.17	0.68	0.67	0.66	0.08	0.08	2.27	0.58	1.93	2.24	3.33	0.71	0.69	0.69	0.08	0.08
	1.1	0.74	1.19	2.57	2.58	0.77	0.69	0.55	0.67	2.02	1.64	0.79	1.26	2.70	2.71	0.80	0.72	0.57	0.71	2.12	1.73
	1.2	0.86	1.91	1.5	0.77	0.70	0.71	0.5	0.72	0.76	0.56	0.91	2.00	1.58	0.81	0.74	0.74	0.52	0.75	0.80	0.59
	1.3	0.88	0.74	0.99	1.12	0.72	0.76	0.58	0.77	0.65	0.54	0.93	0.78	1.04	1.18	0.75	0.79	0.61	0.81	0.68	0.57
	1.4	1.03	0.78	1.08	1.22	0.74	0.84	0.7	0.83	0.70	0.58	1.09	0.82	1.14	1.28	0.77	0.88	0.73	0.87	0.74	0.61
	1.5	1.14	0.87	1.21	1.37	0.80	0.84	0.76	0.89	0.70	0.64	1.20	0.91	1.27	1.43	0.83	0.89	0.79	0.94	0.74	0.67
	1.6	1.28	0.92	1.33	1.42	0.9	0.94	0.85	0.95	0.77	0.71	1.35	0.96	1.40	1.49	0.94	0.99	0.89	1.00	0.80	0.74
	1.7	1.32	1.05	1.36	1.48	0.93	0.95	0.89	0.99	0.85	0.81	1.38	1.10	1.43	1.56	0.98	1.00	0.94	1.04	0.90	0.86
	1.8	1.39	1.10	1.42	1.52	1.01	1.03	0.99	1.01	0.91	0.85	1.47	1.16	1.49	1.60	1.06	1.08	1.04	1.07	0.95	0.89
	1.9	1.45	1.16	1.44	1.49	1.05	1.08	1.02	1.09	1.00	0.96	1.53	1.22	1.52	1.55	1.10	1.14	1.07	1.15	1.05	1.00
	2.0	1.52	1.20	1.48	1.57	1.07	1.05	0.97	1.05	1.03	1.01	1.6	1.26	1.55	1.65	1.12	1.10	1.02	1.10	1.08	1.06

Продолжение таблицы 6.2.

Усилие, которым нагружается консольная балка, *H*

№ варианта		5				6				7				8				9			
l, мм		280	271	282	262	222	219	231	230	260	270	290	280	284	250	221	224	240	241	252	253
b, мм		109	107	110	112	99	100	97	98	113	98	109	112	113	110	97	99	100	99	98	98
h_1, мм		31	31	30	31	32	32	31	31	33	33	34	34	33	32	32	32	33	32	32	32
Время, с.	0	0	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0	0.02	0.02	0.04	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07
	0.1	0.02	0	0.02	0	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08	0.02	0	0.02	0	0.05	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08
	0.2	0.02	0.02	0	0	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.02	0.02	0	0	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07
	0.3	0	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.04	0.09	0.08	0.10	0	0.02	0.04	0.07	0.09	0.05	0.04	0.09	0.08	0.10
	0.4	0	0	0.07	0.02	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	0.10	0	0	0.07	0.02	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	0.10
	0.5	0	0	0.02	0.05	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07	0	0	0.02	0.05	0.09	0.08	0.07	0.09	0.08	0.07
	0.6	0.03	0.02	0.04	0	0.07	0.07	0.06	0.10	0.08	0.06	0.03	0.02	0.04	0	0.07	0.07	0.06	0.10	0.08	0.06
	0.7	0	0	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.15	0.07	0.07	0	0	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.17	0.07	0.07
	0.8	0.95	0	0.42	1.02	0.09	2.56	0.08	0.37	0.07	0.05	1.10	0	0.48	1.18	0.09	2.98	0.08	0.42	0.07	0.05
	0.9	1.49	0.01	1.05	1.54	1.86	0.70	2.39	3.06	0.07	0.07	1.72	0.01	1.22	1.78	2.16	0.82	2.77	3.55	0.07	0.07
	1.0	2.05	0.52	1.74	2.03	3.01	0.64	0.63	0.63	0.08	0.08	2.37	0.61	2.02	2.35	3.48	0.75	0.72	0.72	0.08	0.08
	1.1	0.70	1.14	2.44	2.45	0.73	0.65	0.52	0.64	1.91	1.56	0.82	1.32	2.83	2.83	0.84	0.76	0.6	0.74	2.22	1.81
	1.2	0.82	1.81	1.42	0.73	0.67	0.67	0.47	0.68	0.72	0.53	0.95	2.10	1.65	0.85	0.77	0.77	0.55	0.79	0.84	0.62
	1.3	0.84	0.70	0.93	1.07	0.68	0.72	0.55	0.73	0.62	0.51	0.97	0.82	1.09	1.23	0.79	0.83	0.64	0.85	0.71	0.60
	1.4	0.98	0.74	1.03	1.16	0.70	0.80	0.66	0.79	0.67	0.55	1.14	0.86	1.19	1.34	0.81	0.93	0.77	0.91	0.77	0.64
	1.5	1.08	0.82	1.15	1.30	0.76	0.80	0.72	0.85	0.67	0.61	1.27	0.96	1.33	1.50	0.87	0.93	0.83	0.98	0.77	0.70
	1.6	1.22	0.87	1.26	1.35	0.85	0.89	0.81	0.90	0.73	0.67	1.42	1.01	1.46	1.56	0.99	1.04	0.93	1.05	0.84	0.78
	1.7	1.26	1.00	1.29	1.41	0.89	0.90	0.85	0.94	0.81	0.77	1.45	1.15	1.50	1.63	1.03	1.05	0.98	1.09	0.94	0.90
	1.8	1.33	1.05	1.35	1.45	0.96	0.97	0.94	0.96	0.86	0.81	1.53	1.21	1.56	1.67	1.11	1.13	1.09	1.12	1.00	0.93
	1.9	1.39	1.10	1.37	1.40	1.00	1.03	0.97	1.04	0.95	0.91	1.60	1.28	1.59	1.63	1.15	1.19	1.12	1.20	1.10	1.05
	2.0	1.45	1.14	1.40	1.49	1.01	0.99	0.92	1.00	0.98	0.96	1.67	1.32	1.63	1.73	1.17	1.15	1.07	1.15	1.13	1.11

Таблица 6.3

Прогиб неразрушенного ледяного поля под нагрузкой, мм

		№ варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h_l, мм		32	30	28	32	50	30	27	26	31	45
Время, с.	0	1.57	1.84	2.15	1.48	1.74	1.68	1.97	2.30	1.58	1.86
	1	1.53	1.82	2.15	1.51	1.77	1.64	1.95	2.31	1.62	1.90
	2	1.12	1.83	2.17	1.10	1.71	1.20	1.96	2.32	1.17	1.83
	3	1.23	1.51	1.71	1.15	1.70	1.31	1.61	1.83	1.23	1.82
	4	1.17	1.55	1.69	1.13	1.43	1.25	1.66	1.81	1.21	1.53
	5	1.21	1.53	1.66	1.09	1.48	1.29	1.64	1.78	1.17	1.58
	6	1.17	1.51	1.64	1.06	1.44	1.26	1.61	1.76	1.14	1.55
	7	1.50	1.52	1.66	1.61	1.52	1.60	1.62	7.77	1.72	1.63
	8	1.48	1.87	1.68	1.48	1.68	1.58	2.00	1.80	1.58	1.80
	9	1.53	1.81	1.58	1.48	1.75	1.64	1.94	1.69	1.58	1.88
	10	1.53	1.83	2.18	1.46	1.70	1.64	1.96	2.33	1.57	1.82
	11	1.60	1.84	2.16	1.47	1.77	1.71	1.97	2.31	1.57	1.89
	12	1.53	1.84	2.12	1.50	1.70	1.63	1.97	2.27	1.60	1.82
	13	1.58	1.84	2.13	1.34	1.73	1.69	1.97	2.28	1.43	1.85
	14	0.80	1.84	1.10	0.66	1.30	0.86	1.96	1.18	0.71	1.39
	15	0.89	1.67	1.25	0.75	1.22	0.96	1.79	1.34	0.80	1.31
	16	0.83	1.20	1.17	0.71	1.23	0.88	1.29	1.25	0.76	1.32
	17	0.87	1.25	1.16	0.67	1.26	0.93	1.33	1.24	0.72	1.35
	18	0.76	1.24	1.09	0.68	1.23	0.81	1.33	1.17	0.73	1.31
	19	0.86	1.28	1.19	0.62	1.26	0.92	1.37	1.27	0.66	1.35
	20	0.81	1.27	1.10	0.65	1.20	0.86	1.36	1.18	0.70	1.28
	21	1.12	1.25	2.10	0.78	1.77	1.20	1.34	2.25	0.84	1.89
	22	1.51	1.2	2.02	1.50	1.65	1.62	1.28	2.16	1.61	1.77
	23	1.54	1.88	2.02	1.48	1.68	1.65	2.02	2.17	1.58	1.8
	24	1.56	1.77	2.11	1.38	1.67	1.67	1.90	2.26	1.48	1.79
	25	1.55	1.81	2.09	1.41	1.69	1.66	1.93	2.24	1.50	1.81

Порядок выполнения работы

1. По табличным данным (табл. 6.2) строятся графики зависимости разрушающего балку усилия от времени $P = P(t)$. По этим графикам определяется величина максимального усилия с учетом влияния сил плавучести. Результаты определения заносятся в табл. 6.4.

Таблица 6.4

№ балки	l, м	b, м	h_l, м	P, Н	σ_{f0}, кПа	l/b	σ_f, кПа
1							
2							
3							
4							
					Среднее	значение	

2. По формуле (6.2) рассчитывается прочность моделированного льда на изгиб. Результаты расчета сводятся в табл. 6.4.

3. Рассчитывается значение l/b, результаты расчета сводятся в табл. 6.4.

4. По графикам, приведенным на рис. 6.2, определяется поправка, а затем вычисляется окончательное значение прочности льда. При нахождении поправки следует принимать модуль Юнга равным 5 МПа. Результаты расчета сводятся в табл. 6.4.

5. Рассчитывается среднее значение прочности льда на изгиб, результат заносится в табл. 6.4.

6. По формуле (6.3) рассчитывается среднеквадратичное отклонение и проводится проверка полученных данных на соответствие критерию Шовене. При необходимости грубые ошибки исключаются из рассмотрения и среднее значение прочности льда на згиб рассчитывается заново.

7. По данным таблицы 6.3 строится зависимость прогиба ледяного поля от времени. Поэтому графику определяют прогибы ледяной пластины.

8. Проводят расчеты модуля Юнга. Определяют среднее значение модуля Юнга. Результаты расчетов сводятся в табл. 6.5.

Таблица 6.5

P, H	Результат измерения, мм	Прогиб, м	h_l, м	E, МПа
0				-
5				
10				
Среднее значение				

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1. Графики зависимостей разрушающего лед усилия от времени, содержащие определение величины максимального разрушающего усилия.
2. Расчет прочности льда на изгиб, представленный в форме табл. 6.4.
3. График зависимости от времени прогиба ледяного покрова, содержащий определение величин прогиба льда.
4. Расчет модуля Юнга льда, представленный в форме табл. 6.5.
5. Анализ всех полученных результатов.

Лабораторная работа № 7

Определение плотности моделированного морского льда

Литература

1. Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. - 78 с.

2. Патент RU 2227284 C2 МПК G 01 N 9/02. Способ определения плотности моделированного морского льда и устройство для его реализации. / Е.Б. Карулин, М.М. Карулина, А.А. Курленков, № 2002106957, заявл. 18.03.2002, опубл. 20.04.2004, Бюл. № 33.

Общие пояснения

Плотность льда является одной из важнейших его характеристик, поэтому методам ее определения придается большое значение. Плотность льда характеризует такие фундаментальные свойства льда, как вес и плавучесть. Без данных о плотности льда невозможно корректно выполнить расчет сопротивления льда движению судна или ледовой нагрузки на шельфовые инженерные сооружения.

Известно, что морской лед представляет собой сложный композитный материал, в состав которого входят кристаллы собственно льда, растворенные в морской воде соли в виде растворов (рассол) и выпавших в осадок твердые кристаллогидраты солей. Кроме этого в состав льда входят газы, минеральные и биологические включения. При изменении температуры и внешних воздействиях во льду могут протекать различные физические процессы, в том числе и фазовые переходы, приводящие к изменению его плотности. Зависимость плотности льда от солености и температуры представлена на рис. 7.1. Поэтому методы определения плотности льда должны разрабатываться таким образом, чтобы в максимальной степени исключить возможность изменения плотности в процессе проведения измерений.

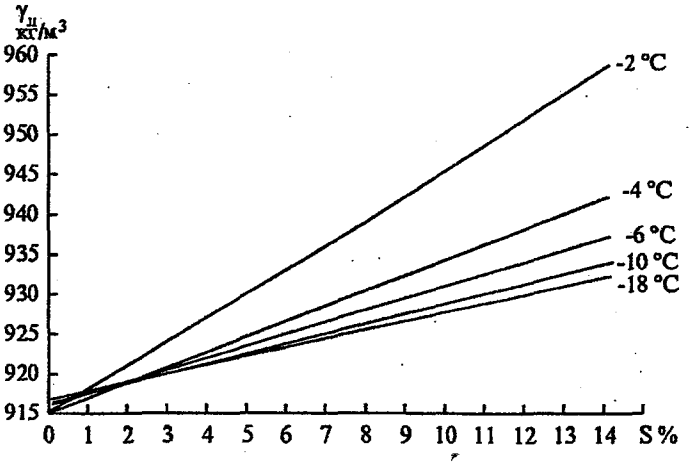


Рис. 7.1. Зависимость плотности льда от солености и температуры

Первая методика определения плотности морского льда была разработана известным полярным исследователем Ф. Мальмгреном. Им же проведены скрупулезные исследования этой характеристики льда. Последующие исследователи развивали и улучшали эту методику.

Интерес к разработке новых методов определения плотности льда возник в связи с началом работы ледовых опытовых бассейнах, в которых на моделях исследуется взаимодействие судов и инженерных сооружений со льдом. Для обеспечения возможности функционирования ледовых бассейнов были разработаны специальные технологии получения моделированного морского льда, имеющего уменьшенную в λ раз прочность (λ – масштаб модели). В практически всех известных технологиях используют раствор NaCl в воде для намораживания льда. Соленость раствора колеблется в пределах 8 – 17 ‰. Особенностью моделированного льда является то, что с точки зрения традиционной возрастной классификации льда он представляет собой одну из форм молодого только что сформировавшегося льда. Такой лед обладает повышенной соленостью, так как в нем еще не успели пройти процессы вытекания рассола. Применение обычной методики для определения плотности моделированного льда может привести к неправильной оценке этой характеристики.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Основным методом определения плотности льда γ является метод гидростатического взвешивания. При выполнении этого метода последовательно выполняют следующие операции.

1. Из ледяного покрова извлекается тем или иным способом кусок льда, плотность которого подлежит измерению. Никаких специальных требований к куску льда не предъявляется, кроме того, что он должен влезать в измерительные емкости.
2. Выполняется измерение веса куска льда на воздухе.
3. Затем кусок льда полностью погружается в жидкость, после чего проводят взвешивание куска льда в жидкости. Жидкость для проведения эксперимента выбирают такой, чтобы ее плотность была бы заведомо меньше, чем ожидаемая плотность льда.
4. Значение плотности льда находится расчетом по формуле:

$$\gamma = \frac{M_a \gamma_w}{M_a \quad M_w}. \tag{7.1}$$

Здесь M_a, M_w – результат взвешивания куска льда на воздухе и в воде соответственно; γ_w – плотность жидкости, кг/м^3.

Оценим случайную погрешность метода в предположении, что случайная погрешность взвешивания σ_m не зависит от того, где проводят взвешивание в жидкости или на воздухе. Тогда в соответствии со стандартными формулами получим:

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\gamma_w}\sigma_w\right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial M_a}\sigma_m\right)^2 + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial M_w}\sigma_m\right)^2} = \sqrt{\frac{M_a^2}{M_a - M_w}\sigma_w^2 + \frac{\gamma_w\left(M_a^2 + M_w^2\right)}{(M_a - M_w)^4}\sigma_m^2}. \tag{7.2}$$

Здесь σ_w – случайная погрешность контроля плотности жидкости.

В относительной форме:

$$\sigma_{\gamma}^{\text{отн}} = \frac{\sigma_{\gamma}}{\gamma} = \sqrt{\left(\sigma_{w}^{\text{отн}}\right)^2 + \frac{M_a^2 + M_w^2}{\left(M_a - M_w\right)^2}\left(\sigma_{m}^{\text{отн}}\right)^2}, \qquad (7.3)$$

где $\sigma_{w}^{\text{отн}}, \sigma_{m}^{\text{отн}}$ – относительные погрешности σ_{w} и σ_{m}. Так как числитель дроби во втором слагаемом подкоренного выражения формулы (7.3) всегда больше знаменателя, то даже при малом $\sigma_{w}^{\text{отн}}$ относительная погрешность определения плотности льда $\sigma_{\gamma}^{\text{отн}}$ всегда больше $\sigma_{m}^{\text{отн}}$. Это превышение увеличивается с ростом M_w. Из этого следует. Что для снижения величины $\sigma_{m}^{\text{отн}}$ необходимо уменьшать M_w, например, использовать жидкость, плотность которой близка к плотности льда.

Возможна другая последовательность действий при реализации метода гидростатического взвешивания. В этом случае производят только одно взвешивание в жидкости с известной плотностью, но при этом объем куска льда V_l должен быть известен. Расчет плотности льда выполняется по формуле

$$\gamma = \frac{M_w}{V_l} + \gamma_w. \qquad (7.4)$$

Случайная погрешность этого метода вычисляется по формуле

$$\sigma_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sigma_{m}^2}{V_l^2} + \frac{M_{w}^2}{V_l^2}\sigma_{V}^2 + \sigma_{w}^2}, \qquad (7.5)$$

а в относительной форме –

$$\sigma_{\gamma}^{\text{отн}} = \sqrt{\frac{\left(\sigma_{w}^{\text{отн}}\right)^2}{\left(1+\frac{M_w}{\gamma_w V_I}\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{m}^{\text{отн}}\right)^2}{\left(1+\frac{\gamma_w V_I}{M_w}\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{V}^{\text{отн}}\right)^2}{\left(1+\frac{\gamma_w V_I}{M_w}\right)^2}}. \qquad (7.6)$$

Здесь σ_V, $\sigma_V^{\text{отн}}$ – абсолютная и относительная случайные погрешности контроля объема образца соответственно. Из этих формул следует, что основной путь снижения случайной погрешности состоит в использовании жидкости, плотность которой близка к плотности льда.

К жидкости, в которой производят взвешивание льда предъявляются следующие требования:

– она не должна растворять лед;

– плотность жидкости должна лежать в пределах 700 – 800 кг/м^3;

– температура кристаллизации жидкости должна быть ниже – 20 °С;

– жидкость должна быть марки ЧДА (чистой для анализов).

Последнее требование часто не выполняется, так как на практике обычно используют керосин или легкие фракции бензина.

Описанные выше процедуры имеют ряд недостатков при использовании ее для определения плотности моделированного льда. Основным недостатком является необходимость проведения взвешивания образца льда на воздухе. При этом из куска льда может стекать рассол, а плотность льда может уменьшаться. Рассол будет стекать из куска льда (правда, с меньшей интенсивностью, чем на воздухе) и при проведении взвешивания образца в жидкости. Для решения же многих инженерных задач необходимо определять плотность льда вместе с содержащимся в нем рассолом.

Еще одним недостатком описанных методов является необходимость проектирования и изготовления специальных креплений, обеспечивающих фиксацию взвешиваемого образца в жидкости. Эти крепления не должны нарушать целостность образца. Применительно к исследованиям моделированного льда выполнить это условие достаточно сложно, так как моделированный лед обладает пониженной прочностью и легко разрушается.

Для преодоления указанных недостатков была разработана специальная методика определения плотности моделированного льда, при выполнении которой выполняют следующие операции.

1. Не извлекая выбранный для определения плотности кусок моделированного льда из воды бассейна, его перемещают в измерительный сосуд. Для этого кусок льда зачерпывается измерительным сосудом прямо с поверхности воды.

2. Кусок льда принудительно притапливают до полного погружения в воду специальным приспособлением, размещенным на крышке измерительного сосуда, при этом отмечают уровень жидкости в сосуде.

3. Производят взвешивание сосуда вместе с притопленным куском льда.

4. После взвешивания быстро удаляют кусок льда из сосуда и проводят повторное взвешивание сосуда с водой, но без льда.

5. Разность между двумя результатами взвешивания позволяет судить о весе куска льда.

6. В измерительный сосуд из мензурки добавляется вода так, чтобы уровень воды в сосуде совпал с уровнем, зафиксированным при взвешивании вместе с куском льда. По объему добавленной жидкости судят об объеме куска льда.

7. Плотность льда рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{M_1 \quad M_2}{gV_l}, \tag{7.7}$$

где M_1 – результат взвешивания сосуда вместе с образцом льда; M_2 – результат взвешивания сосуда без образца льда; g – ускорение свободного падения.

Для осуществления описанной процедуры создано специальное устройство, разрез которого представлен на рис. 7.2. В устройство входит прозрачный измерительный сосуд 1, в который вставлен водонепроницаемый съемный контейнер 2. Сверху сосуд накрыт съемной крышкой-притапливателем 3 с упорными фланцами 4, которая устанавливается на верхнем торце сосуда 1. На боковой стенке сосуда 1 установлен уровнемер жидкости в виде мерной линейки 5. В состав измерительного устройства входят также мензурка и весы. Цифрой 6 на рисунке обозначен кусок льда.

Оснащение устройства съемным водонепроницаемым контейнером позволяет быстро удалять из сосуда кусок льда. Крышка-

притапливатель позволяет правильно определить объем выбранного образца льда и существенно снизить площадь свободной поверхности жидкости в сосуде, что способствует повышению точности измерений.

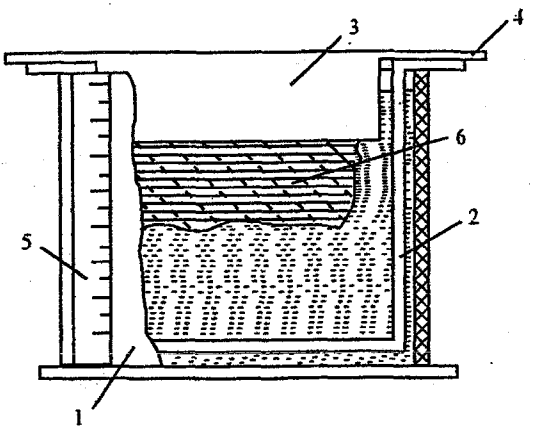


Рис. 7.2 Схема устройства для измерения плотности моделированного льда

Порядок выполнения работы

Для проведения работы используется специальная лабораторная установка, содержащая измерительный сосуд, крышку-притапливатель, мензурку и электронные весы ТВ-10К-М.

Моделированный лед имитируется при выполнении работы кусками парафина. Такая замена материала при выполнении лабораторной работы вполне допустима. Парафин имеет плотность близкую к плотности моделированного льда. До создания первых ледовых опытовых бассейнов исследования взаимодействия судов с битым льдом проводились в обычных гидродинамических бассейнах, при этом битый лед имитировался кусками парафина.

Опыты последовательно проводятся с каждым из пяти кусков парафина. Последовательность действий при проведении опытов описана выше. Результаты опытов заносятся в таблицу.

Таблица

Результаты измерений

№ образца	Уровень воды в измерительном сосуде, мм	Масса измерительного сосуда вместе с образцом, кг	Масса измерительного сосуда без образца, кг	Объем добавленной в сосуд воды, $м^3$	Плотность образца, $кг/м^3$
1					
2					
3					
4					
5					

После завершения расчетов необходимо определить среднее значение плотности парафина.

Порядок проведения взвешиваний на электронных весах ТВ-10К-М

1. Установка нулевых показаний. Если круг не отображается напротив индикатора нуля $(\rightarrow 0 \leftarrow)$ в момент, когда не осуществляется никаких взвешиваний, то необходимо нажать клавишу **"ON/ZERO"** для установки нулевых показаний.

2. Взвешивание. Весы необходимо нагружать аккуратно, избегая ударов взвешиваемых предметов по платформе, так как они могут привести к выходу из строя весового датчика. Не рекомендуется оставлять весы под нагрузкой длительное время, это может привести к нарушению метрологических характеристик весового датчика.

Перед взвешиванием убедитесь, что напротив индикатора нуля сгорит круг!

После помещения груза на платформу на дисплее отобразится масса данного груза.

Составление отчета

В состав отчета по лабораторной работе входят:

1. Теоретическая часть, содержащая *самостоятельно выведенные формулы* для оценки случайной и систематической погрешности метода определения плотности льда;
2. Таблица результатов экспериментов;
3. Анализ полученных результатов;
4. краткие выводы по работе.

Лабораторная работа № 8

Расчетное определение характеристик пенольда

Литература

1. *Сморыгин Г.И.,* Теоретические основы получения льда рыхлой структуры.– Новосибирск: Наука (сиб. отд.), 1984. – 158 с.

2. *Левинский Б.В., Пятаков В.Г., Сафонов В.Ф.* Научные основы процесса намораживания водно-воздушных пен на грунт и их практическая реализация. / В кн.: "Проблемы инженерной гляциологии". – Новосибирск: Наука, 1986, с. 66–72.

Общие пояснения

В последние годы расширяется использование льда и снега в качестве строительных и теплоизоляционных материалов. Широкое использование этих материалов стало возможным благодаря использованию современных технологий, позволяющих получать необходимое количество льда на месте, без добычи и транспортировки.

Все современные технологии базируются на факельном диспергировании воды в холодную атмосферу. При капельном намораживании воды интенсивность ледообразования возрастает в 10–20 раз по сравнению с послойным. Основная причина столь резкого увеличения интенсивности заключается в резком увеличении площади контакта воды с охлаждающей средой. Особенно важно, что получаемый такими способами лед имеет рыхлую структуру и обладает малой плотностью. Можно управлять свойствами получаемого ледяного покрова, изменяя параметры диспергированного водного потока. Искусственный лед по способам получения и свойствам подразделяется на три типа: пористый (пенолед), гранулированный и аэрированный гранулированный (рис. 8.1).

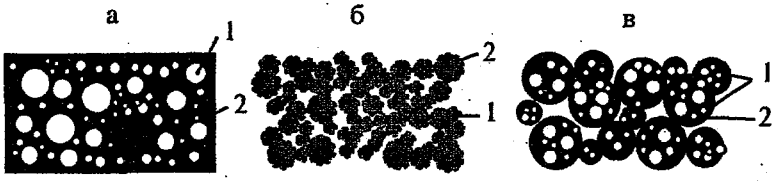


Рис. 8.1. Типы искусственного рыхлого льда.
а – пористый (пенолед); б – гранулированный; в – аэрированный гранулированный; 1 – воздух; 2 – лед

Возможность получения льда рыхлой структуры позволяет разрабатывать оригинальные технологии его применения. Так, пенолед используется как теплоизоляционный материал для отепления больших площадей.

Гранулированный лед получают путем диспергирования воды в охлажденный воздух. Пенолед и аэрированный гранулированный лед получают при добавлении к воде поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для получения аэрированного гранулированного льда используется диспергирование жидкости механическими прямоструйными форсунками с использованием большого перепада давления > 5 МПа.

Наиболее изученным и часто применяемым в практической хозяйственной деятельности является пенолед, который получают послойным намораживанием механически вспененного водного раствора высокомолекулярных ПАВ. Основная трудность при производстве пенольда заключается в явлении сенирезиса. Так называется процесс истечения из пены жидкой фазы, что приводит к уменьшению толщины пленок жидкости, образующих пену и, в конечном счете, к разрушению ее при замораживании.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Для описания пен необходимо иметь информацию о следующих их свойствах.

1. Пенообразующая способность раствора, которая определяется количеством пены, образующейся из постоянного объема раствора в течение данного времени при соблюдении определенных условий.

2. Кратность пены k, представляющая собой отношение объема пены V_s к объему раствора V_f, необходимого для ее приготовления равна

$$k = \frac{V_s}{V_f} = \frac{V_g + V_f}{V_f},$$

где V_g – объем газовой фазы в пене.

3. Стабильность пены, которая определяется временем существования элемента пены (пленки, отдельного пузыря) или определенной части ее объема.

4. Дисперсность пены, которая определяется средним размером пузырька, распределением пузырьков по размерам или поверхностью раздела газ-жидкость в единице объема пены.

Одним из условий успешного намораживания защитных пен на защищаемые поверхности является правильный выбор высоты слоя пены h, который намораживается при единичном технологическом акте. Практика работы показывает, что равномерное нанесение слоя пены толщиной < 50 мм связано большими трудностями из-за значительной шероховатости поверхности намораживания. Удовлетворительные результаты получаются при толщине слоя, который обеспечивает полное его смерзание до того, как начнется процесс синерезиса. В зависимости от концентрации ПАВ в растворе время начала синерезиса колеблется от 10 до 300 с.

Как показывают результаты экспериментальных и теоретических исследований, сформировать покров сформировать покров из пенольда путем намораживаний элементарных слоев пены до начала истечения из нее жидкости не удается. Для интенсификации процесса замораживания пены применяют ее диспергирование в атмосферу при отрицательных температурах воздуха.

Одной из задач, которые необходимо решить при реализации этого метода производства пенольда, является определение размеров хлопьев пены и максимальной высоты, на которую необходимо забросить эти хлопья, чтобы они успели полностью замерзнуть до падения на землю.

Принимая в первом приближении форму хлопьев пены сферической, для оценки времени полного их смерзания используем следую-

щую формулу, полученную при рассмотрении теплового баланса падающей капли:

$$\tau = \frac{6.98 \cdot 10^6 \rho_s R^2}{|t|\left(2 + 230\sqrt{R v_\infty}\right)}. \qquad (8.1)$$

Здесь τ – время, необходимое для полного смерзания капли, с; R – радиус капли, м; ρ_s – плотность пены, кг/м^3; t – температура воздуха, °С; v_∞ – скорость падения капли, м/с.

Скорость падения хлопьев пены оценивается по формуле:

$$v_\infty = \sqrt{\frac{8 g \rho_s R}{3 c_d \rho_a}}, \qquad (8.2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ_a – плотность воздуха, кг/м^3; c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления пенного шарика. Плотность воздуха зависит от температуры (при постоянном давлении 1013 мПа) и может быть рассчитана по формуле

$$\rho_a = \rho_{a0} \frac{273.1 + t_0}{273.1 + t} \frac{p}{p_0}. \qquad (8.3)$$

Здесь отмеченные индексом "0" величины – известные значения плотности и температуры воздуха; p – давление. По ним можно рассчитать значение плотности воздуха при другой температуре.

Коэффициент сопротивления движению пенного шарика в воздухе вычисляется по формуле

$$c_d = 4.3(\lg \mathrm{Rn})^{-2}, \qquad (8.4)$$

где $\mathrm{Rn} = \frac{v_\infty R}{\nu} > 500$ – число Рейнольдса; $\nu = \frac{\mu}{\rho_a}$ м²/с – кинематическая вязкость воздуха, μ – динамическая вязкость воздуха, $\frac{H \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$.

Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры (при атмосферном давлении) задается следующим выражением:

$$\mu = \left(1700 + 5.8t - 0.011t^2\right)10^{-7}. \qquad (8.5)$$

Из выражения (8.4) следует, что для определения коэффициента сопротивления движению капли необходимо знать скорость падения капли. В то же время, в выражении (8.2) коэффициент сопротивления сам используется для нахождения скорости падения капли. В сложившейся ситуации определение скорости падения капли можно осуществить только методом последовательных приближений. В качестве первого приближения можно выбрать эмпирическую формулу, применяющуюся для расчета скорости падения снежных хлопьев:

$$v_\infty = 0.67\left(\rho_s - \rho_a\right)^{0.25}. \qquad (8.6)$$

Расчет осуществляется следующим образом. По заданной температуре воздуха по формуле (8.3) вычисляется плотность воздуха. Полученное значение плотности, а также плотность пены подставляются в формулу (8.6) и определяется в первом приближении скорость падения хлопьев пены. С этой величиной рассчитывается первое приближение коэффициента сопротивления, а затем по формуле (8.2) определяется второе приближение скорости падения хлопьев. После этого вычисляют второе приближение коэффициента сопротивления и, с его помощью, третье приближения для скорости падения хлопьев. На этом расчет обычно прекращают.

Высота H, на которую необходимо забросить капли, определяется по простой формуле:

$$H = v_\infty \tau.$$

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 8.1, варианты 0–9.

Расчет выполняется для следующего набора диаметров пенных шариков:3, 5, 10, 15 и 20 мм

Таблица 8.1

Исходные данные

Характеристика	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Плотность пены, кг/м^3	60	65	70	75	80	85	90	95	100	60
Температура воздуха, °С	-20	-25	-30	-35	-40	-35	-30	-25	-20	-40

Порядок выполнения работы

1. По заданной температуре воздуха рассчитать его плотность, динамическую и кинематическую вязкость.
2. Вычислить первое приближение для скорости падения пенных хлопьев для всех заданных размеров пенных шариков.
3. Рассчитать коэффициент аэродинамического сопротивления падению хлопьев и найти второе приближение для скорости их падения.
4. Рассчитать второе приближение коэффициента аэродинамического сопротивления падению хлопьев и найти третье (окончательное) приближение для скорости их падения.
5. Определить время, необходимое для полного замерзания пенных шариков во время падения.
6. Определить необходимую высоту заброса пенных хлопьев.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1. Результаты выполненных расчетов, сведенные в табличную форму.
2. Графики зависимостей $H = f(R)$, $\tau = g(R)$.
3. Анализ полученных результатов, содержащий вывод о возможности и об оптимальных режимах применения данной технологии

Лабораторная работа № 9

Определение деформативной и термической устойчивости сооружений из льда

Литература

1. *Войтковский К.Ф.* Расчет сооружений из льда и снега.– М.: изд. АН СССР, 1954. – 158 с.

2. *Щелоков В.К.* Ледяные хранилища. – М.: Наука, 1967. – 120 с.

Общие пояснения

Строительство изо льда известно с давних времен, особенно в полярных странах. Из-за недостатка естественных строительных материалов, таких как камень или дерево люди были вынуждены устраивать для жилья ледяные пещеры или хижины. Многими исследователями севера описаны хижины эскимосов – «иглу», которые они с большим искусством возводят из снега. Эти хижины можно отапливать тюленьим жиром, что обеспечивает вполне сносные условия существования в них.

Широко известен факт строительства в Петербурге в 1740 г. по приказу императрицы Анны Иоановны ледяного дома длиной 17 м, шириной 5.3 м и выстой до конька кровли 6.4 м. И в последствии лед часто использовался как строительный материал. Наиболее часто его использовали в военном деле для создания оборонительных сооружений.

Более широкое применение льда для строительства началось со второй трети XX в. Были разработаны и внедрены различные сооружения из льда: дамбы, причалы, мост,. склады для хранение сельсозпродукции и т.д.

В настоящее время в связи с освоением природных богатств Крайнего Севера и Дальнего Востока вновь возник интерес к инженерным сооружениям из льда и снега. В этих регионах только лед и снег часто являются единственными естественными строительными метериалами, которые легко могут быть добыты на месте. Поэтому экономически оказывается выгодным создавать из них временные инженерные сооружения. Еще одним несомненным достоинством сооружений из льда и снега является их самоликвидируемость. В соответствии с современными требованиями любое инженерное сооружение, возводи-

мое на севере, должно быть демонтировано после истечения срока его использования. Часто демонтаж сооружения не менее сложная задача, чем его строительство.

При возведении сооружений из льда и снега необходимо обеспечить их деформативную и термическую устойчивость на время эксплуатации сооружения. При длительном воздействии постоянных по величине нагрузок, что обычно наблюдается в ледяных сооружениях, подверженных воздействию постоянной нагрузки от собственного веса, пластические деформации приобретают характер вязкого течения. Эти течения характеризуются коэффициентом вязкости η. Его величина зависит от уровня действующих напряжений и времени их действия, а также от структуры льда, ориентировки кристаллов и температуры. Известный исследователь льда К.Ф. Войтковский рекомендует расчитывать коэффициент вязкости по следующим формулам:

– для расчета сводов

$$\eta' = \frac{1+|t_l|}{K\tau}, \tag{9.1}$$

– для расчета опор

$$\eta'' = \frac{2}{q_k + \frac{\rho_l h}{2}}\left(\frac{1+|t_l|}{K}\right). \tag{9.2}$$

Здесь t_l – средняя по сечению конструкции за расчетный период температура льда °С; K – коэффициент, зависящий от структуры льда, для льда беспорядочной структуры; τ – расчетное значение интенсивности касательных напряжений; $\tau = 20000\ Н/м^2$;

$$K = 1.11 \cdot 10^{16}\ \frac{м^4 \cdot град}{кг^2 \cdot с};$$

q_k – среднее значение расчетной нагрузки на опору, $H/м^2$;

$\rho_l = 900 \ \frac{кг}{м^3}$ плотность льда; h – высота опоры, м.

В формулах (9.1) и (9.2) учтено, что большинство ледяных сооружений можно представить состоящими из свода и поддерживающих его опор.

Термоустойчивость ледяного инженерного сооружения может быть обеспечена за счет термоизоляции ледяного массива. Обычно теплоизоляция осуществляется путем насыпания толстого слоя опилок на лед. Толщина такого слоя теплоизоляции в метрах для небольших ледяных инженерных конструкций может быть расчитатана по следующей эмпирической формуле:

$$h_p = 0.47 + 0.0113 \cdot 10^3 t_a \Theta, \qquad (9.3)$$

где t_a – температура воздуха, принимается, что поверхность теплоизоляционного слоя имеет ту же температуру; Θ – расчетная продолжительность теплого периода в часах. В работе эта величина принимается равной 2 месяцам.

Методика выполнения работы

Теоретические основы

Расчет ледотехнического сооружения, например временного лабораторного помещения, на деформативную устойчивость выполняется отдельно для свода и для опорных стенок. Будем считать, что сооружение круглое в плане. В первом приближении принимается, что свод имеет параболические очертания, относительно плоскости, проведенной через пяты свода. Осадка свода может быть расчитана по следующей формуле:

$$\Delta h_1 = \frac{0.25Tl}{\eta'}\left[q_c\beta_c + \left(q_k - q_c\right)\beta_k\right], \qquad (9.4)$$

где T – допустимое время существования сооружения, с; l – расчетный пролет свода, определяемый как расстояние между серединами

пят сводов (диаметр сооружения), м; η' – коэффициент вязкости, определяемый по формуле (9.1); q_c – интенсивность постоянной нагрузки в замке свода (*Н*/м^2) $q_c = \sigma_p + h_0\rho_l$, σ_p – нагрузка на свод термоизоляционного покрытия ($\sigma_p = h_p\rho_p g$); ρ_p – плотность теплоизоляционного покрытия ($\rho_p = 250\ \frac{кг}{м^3}$); h_0 – толщина свода, м; q_k – интенсивность постоянной нагрузки в пяте свода, *Н*/м^2 ($q_k = q_c + f\rho_l$). Здесь f – стрела подъема свода, м; β_c, β_k – расчетные коэффициенты для определения перемещения замка свода, определяемые по табл. 9.1.

Таблица 9.1

Расчетные коэффициенты β_c и β_k

$\frac{h_0}{l}$	f/l					
	3/4	1/2	1/25	1/3	1/35	1/4
Коэффициент β_c						
1/4	0,58	0,68	0,75	0,85	0,95	1,08
1/5	0,72	0,93	1,02	1,20	1,37	1,65
1/6	0,88	1,20	1,30	1,55	1,82	2,20
1/7	1,04	1,50	1,57	1,91	2,23	2,83
1/8	1,13	1,83	1,83	2,26	2,64	3,47
Коэффициент β_k						
1/4	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
1/5	0,11	0,13	0,14	0,15	0,17	0,21
1/6	0,12	0,15	0,17	0,19	0,22	0,27
1/7	0,13	0,18	0,19	0,21	0,25	0,32
1/8	0,15	0,20	0,21	0,23	0,28	0,38

Пластическая осадка опоры (стены) по высоте определяется по формуле

$$\Delta h_2 = \frac{1}{4\eta''}\left(q_k + \frac{\rho_l h}{2}\right)hT, \qquad (9.5)$$

где η'' – коэффициент вязкости, определяемый по формуле (9.2); h – высота опоры.

Полная осадка замка свода составит:

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 . \qquad (9.6)$$

Эта величина не должна превышать 20 % от первоначальной высоты сооружения H, которая расчитывается по формуле

$$H = h + f + h_0 . \qquad (9.7)$$

Рассчитаем толщину слоя льда, который растает под влиянием внутренних источников тепла. К этим источникам тепла являются осветительные приборы и люди, работающие в помещении. Количество тепла, выделяемого ими, может быть расчитано по следующей формуле:

$$Q = (nN + q_h m)T ,$$

где n – количество приборов, включая осветительные; N – средняя мощность прибора, Вт; m – количество работающих людей; $q_h = 139.6$ Вт – мощность, выделяемая одним человеком. Тогда толщина стаявшего слоя может быть рассчитана по формуле

$$h_l = \frac{Q}{L\rho_l S}, \qquad (9.8)$$

где L – удельная теплота плавления льда $L = 334000$ Дж/кг; S – площадь внутренней поверхности сооружения $S = \pi l h + \frac{\pi l^2}{4}$.

Исходные данные

Исходные данные для выполнения работы представлены в табл. 9.2, варианты 0 - 9.

Расчет выполняется для следующего набора диаметров пенных шариков:3, 5, 10, 15 и 20 мм

Таблица 9.2

Исходные данные

Характеристика	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура внутри сооружения t_l, град	-2	-3	-1	-4	-2	-3	-1	-4	-2	-3
Диаметр сооружения l, м	4	5	6	7	4	5	6	7	5	6
Толщина свода h_0, м	1	1	1	1	0,8	1,5	0,75	1,4	0,83	1,2
Стрела подъема свода, м	2	2,5	3	3,5	1	2	2	3	1,67	1,5
Высота стен h, м	2	1,8	2,1	1,9	2	1,8	2,1	1,9	1,7	2,2
Средняя температура воздуха в теплый период t_a, град	15	16	17	18	19	15	16	17	18	19
Средняя мощность приборов N, Вт	100	150	200	170	120	100	150	200	170	120
Количество приборов n	5	6	7	4	3	5	6	8	4	6
Количество людей, m	2	3	2	3	4	2	3	4	2	5

Порядок выполнения работы

1. По заданной продолжительности теплого периода рассчитать необходимую толщину защитного покрытия для ледяного сооружения.

2. Вычислить осадку свода сооружения по формуле (9.4), используя коэффициент вязкости льда, рассчитанный по формуле (9.1). Расчеты провести для различных значений времени службы сооружения.

3. Вычислить осадку стен сооружения по формуле (9.5), используя коэффициент вязкости льда, рассчитанный по формуле (9.2).

Расчеты провести для различных значений времени службы сооружения.

1. Определить суммарную осадку сооружения в зависимости от срока эксплуатации. Определить срок службы, исходя из требования не превышения 20 % уменьшения общей высоты сооружения.

2. Определить толщину слоя льда, который может стаять внутри сооружения из-за наличия в нем источников тепла за время функционирования сооружения.

3. Определить толщину стен сооружения, исходя из требования не превышения 20 % уменьшения толщины стен сооружения.

Составление отчета

В отчет по лабораторной работе входят:

1. Результаты выполненных расчетов, сведенные в табличную форму.

2. График зависимостей $\Delta h = f(T)$, $\Delta h_1 = f(T)$, $\Delta h_2 = f(T)$.

3. Расчет толщины слоя льда, который может стаять внутри сооружения.

4. Анализ полученных результатов, содержащий вывод о возможности использования сооружения.

Учебное издание

Кирилл Евгеньевич Сазонов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
Руководство к лабораторным работам

Редактор *О.С. Крайнова*

ЛР № 020309 о 30.12. 96
Формат 60x90 1/16
Печ. л. 6,0. Тираж 200 экз. Заказ № 328.
РГГМУ, 195196, СПб., Малоохтинский пр., 98

Отпечатано в ООО «Аспринт»