



Российский государственный гидрометеорологический
институт

Е.Ю. КЛЮЙКОВ

ИНЖЕНЕРНАЯ ОКЕАНОЛОГИЯ

Практические работы

Рекомендовано Государственным комитетом Российской Федерации по высшему образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Гидрометеорология", специальности "Океанология".

Е.Ю. Клюйков. Инженерная океанология. Практические работы. – СПб.: изд. РГГМИ, 1996. – 203 с.

Рецензенты: **Н.Н. Загрядская**, проф., д-р техн. наук (Санкт-Петербургский государственный технический университет, кафедра МВТС).

Л.М. Моносов, канд. геогр. наук (Научно-производственная фирма “Экология, водные проблемы, ресурсосберегающие технологии”).

Приводится описание, порядок выполнения и примеры расчета практических работ по дисциплине “Инженерная океанология”, изучаемой студентами-океанологами гидрометеорологического института.

Содержание работ соответствует разделам теоретического курса и включает в себя решение прикладных океанологических задач, выполняемых при гидрометеорологическом обеспечении гидротехнического строительства и других инженерных мероприятий на морских и прибрежных акваториях. При решении предлагаемых задач используются в основном расчетные методы и при этом предполагается применение студентами компьютерной техники.

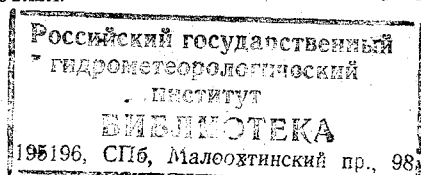
The manual by Ye.Yu. Kluikov “Engineering Oceanography” contains description, order of execution and examples of calculation of practical works in the subject “Engineering Oceanography” studied by oceanography students of the Hydrometeorological Institute.

The essence of the works corresponds to the sections of the theoretical course and includes solution of applied oceanographical problems for hydrometeorological support of hydrotechnical construction and other engineering activities in the sea and coastal areas. To solve the problems considered students will mainly use calculation techniques based on recommended instructions and standardizing manuals; it is assumed that the students will work on computers.

К 1805040600–6 Без объявл.
2К 2(03)–96

ISBN 5–86313–098–7

© Е.Ю.Клюйков, 1996



Предисловие

Изучение курса "Инженерная океанология" студентами океанологической специальности обусловлено все большей ориентацией теоретических разработок в океанологии на решение прикладных задач в различных отраслях хозяйственной деятельности. Это прежде всего гидротехническое строительство: строительство портов, волнозащитных и берегозащитных сооружений, строительство на больших глубинах буровых и добывающих платформ, которые подвергаются значительным воздействиям волн, льда и других гидрометеорологических факторов. Интенсивное использование прибрежной зоны и строительство здесь различного типа сооружений требует изучения процессов переформирования берегов, переноса наносов и заносимости каналов. Значительный рост энергопотребления вызывает интерес к проблеме нетрадиционных источников энергии: волновой энергии, энергии приливов, течений, температурных и соленостных градиентов. Основы инженерного океанологического обеспечения этих и других вопросов и дает дисциплина "Инженерная океанология", изучение которой проводится на старших курсах обучения после освоения специальных дисциплин "Физика океана", "Динамика океана", "Синоптическая метеорология", "Методы обработки океанологической информации" и "Моделирование океанологических процессов".

Изучение курса строится традиционным методом: лекционный материал, практические работы и самостоятельная работа студентов. Настоящее учебное пособие включает в себя 14 практических работ по всем разделам читаемого курса, которые выполняются в течение двух семестров с целью закрепления студентами знаний по теоретической части данной дисциплины, практического ознакомления с методами решения прикладных задач, встречающихся при гидротехнических изысканиях и океанологическом обеспечении отраслей хозяйства. Содержание работ определяется задачами, решение которых в настоящее время представляет наибольший интерес.

Многие методы, принятые для решения тех или иных задач, основаны на использовании нормативных документов и пособий, рекомендованных для практического применения в проектно-изыскательских учреждениях. При этом необходимо помнить, и на это постоянно обращает-

ся внимание в теоретической части курса, что излагаемые методы расчетов (во многих случаях) применяются лишь на стадии эскизного (предварительного) проектирования объектов или выполнения каких-то работ и дают лишь основу для проведения дальнейших исследований. Кроме того, многие предлагаемые в учебном пособии методы и способы расчетов, в целях экономии времени, необходимого для выполнения практических работ, значительно упрощены и поэтому не все работы могут быть использованы как рекомендуемые в инженерной практике. Более точные результаты для рабочего проектирования могут быть получены на основании специальных лабораторных и численных экспериментов с использованием современной экспериментальной и вычислительной техники с учетом всех деталей и особенностей исследуемых районов и проектируемых объектов.

Выполнение практических работ предусматривает широкое использование графиков и номограмм, рекомендуемых к применению в инженерных расчетах и во многих случаях упрощающих получение результата, а также вычислительной техники, которая позволяет существенно сократить время выполнения работ и способствует ее освоению студентами.

По результатам каждой работы необходимо написать отчет, который должен состоять из следующих разделов: задачи работы; теоретическое обоснование работы и метод расчетов; исходная информация и результаты расчетов (все расчеты выполняются в системе СИ); анализ результатов работы.

Отчет должен быть снабжен необходимым иллюстративным материалом в виде таблиц и графиков.

Автор благодарит рецензентов данного пособия профессора кафедры МВТС Санкт-Петербургского государственного технического университета Н.Н. Загрядскую и Генерального директора научно-производственной фирмы "Экология, водные проблемы, ресурсосберегающие технологии" Л.М. Моносова, а также заведующего кафедрой океанологии Российского государственного гидрометеорологического института профессора Ю.П. Доронина за внимательное прочтение рукописи, замечания и полезные советы по изложению предлагаемых работ. Автор выражает глубокую признательность одному из авторов предыдущего издания подобного учебного пособия В.А. Макарову, первоначальный вариант практических работ которого вошли в настоящее учебное пособие.

Работа № 1

Определение характеристик ветра для расчетного шторма в районе порта

Задачи работы

1. Ознакомиться с одной из методик расчета характеристик ветра для расчетного шторма в районе предполагаемого строительства гидротехнического сооружения.
2. Рассчитать максимально возможные скорости ветра за периоды в 1, 5, 10, 25, 50, 100 лет и определить наиболее волноопасное направление ветра для рассматриваемого района.
3. Определить скорость и длину предельного разгона ветра.

Основой для расчета параметров волн служат зависимости высоты волны от скорости ветра и времени его действия или от скорости и длины разгона ветра. Характеристики ветра, необходимые для расчетов параметров волнения получают путем обработки и анализа непосредственных наблюдений за ветром, систематически выполняемых на гидрометеорологических станциях.

Результаты наблюдений характеризуют ветровую обстановку только в районе гидрометеорологических станций и на прилегающих к ним сравнительно небольших акваториях, в пределах которых в каждый момент времени скорость и направление ветра можно считать постоянными, а волнение установившимся. В практической деятельности для решения инженерных задач можно принимать, что наибольшие линейные размеры этих акваторий не должны превышать 50-100 км. Если принять, что в этих случаях параметры волн определяются только скоростью ветра и разгоном волн, то для их расчета достаточно иметь сведения о средней годовой повторяемости скоростей ветра по направлениям (табл. 1.1) [1,2].

В целях гидротехнического строительства для расчета возможных максимальных параметров волн необходимо знать максима-

льные скорости ветра, возможные для наиболее волноопасных направлений, а также располагать данными о повторяемости ветра различной скорости по направлениям. Для определения характеристик ветра, необходимых для расчета параметров волн, на основании данных о повторяемости ветра составляется таблица повторяемости P и вероятности превышения F градаций скорости ветра по направлениям от числа наблюдений при каждом направлении ветра (табл. 1.2) [1,2].

Таблица 1.1. Повторяемость скорости ветра по направлениям

Скорость ветра, м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СВ
0-1	2.0	4.2	8.0	19.3	4.4	1.8	1.2	0.8
2-5	2.3	3.8	10.1	15.5	4.3	2.2	1.1	1.0
6-9	0.6	1.6	2.7	6.4	1.0	0.9	0.6	0.2
10-13	0.1	0.4	1.0	1.5	0.3	0.1	0.1	-
14-17	-	-	0.2	0.3	-	-	-	-
Σp	5.0	10.0	22.0	43.0	10.0	5.0	3.0	2.0

Повторяемость P определяется по формуле [1]:

$$P = \frac{p \cdot 100}{\Sigma p}, \quad (1.1)$$

где p - повторяемость градации скорости ветра; Σp - повторяемость направления ветра (см. табл. 1.1).

По рассчитанным значениям вероятности превышения F (см. табл. 1.2) на билוגарифмической сетке вероятностей (рис. 1.1) строится кривая распределения скорости ветра для каждого направления (по первым ступеням градаций) или только для наиболее волноопасных направлений, если они определены или известны заранее. Построенные таким образом кривые распределения скорости ветра и аппроксимированные прямыми линиями экстраполируются в область малых вероятностей превышения, т.е. в область возможных больших скоростей ветра, не зарегистрированных наблюдениями.

Для гидротехнического строительства представляют наибольший интерес максимальные параметры волн, возможные при данном направлении ветра один раз в заданное число лет, поэтому их и рассчитывают по наиболее вероятной максимальной скорости вет-

Таблица 1.2. Повторяемость P (в знаменателе) и вероятность превышения F (в числителе) градаций скорости ветра по направлениям

Скорость ветра, м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СВ
0-1	<u>100.0</u> 40.0	<u>100.0</u> 42.0	<u>100.0</u> 36.4	<u>100.0</u> 44.8	<u>100.0</u> 44.0	<u>100.0</u> 36.0	<u>100.0</u> 39.7	<u>100.0</u> 40.0
2-5	<u>60.0</u> 46.3	<u>58.0</u> 38.0	<u>63.6</u> 46.0	<u>55.2</u> 36.0	<u>56.0</u> 43.0	<u>64.0</u> 44.0	<u>60.3</u> 37.0	<u>60.3</u> 50.0
6-9	<u>14.0</u> 12.0	<u>20.0</u> 16.0	<u>17.6</u> 12.3	<u>19.2</u> 15.0	<u>13.0</u> 10.0	<u>20.0</u> 18.0	<u>23.3</u> 20.0	<u>10.0</u> 10.0
10-13	<u>2.0</u> 2.0	<u>4.0</u> 4.0	<u>5.3</u> 4.3	<u>4.2</u> 3.5	<u>3.0</u> 3.0	<u>2.0</u> 2.0	<u>3.3</u> 3.3	- -
14-17	- -	- -	<u>1.0</u> 1.0	<u>0.7</u> 0.7	- -	- -	- -	- -

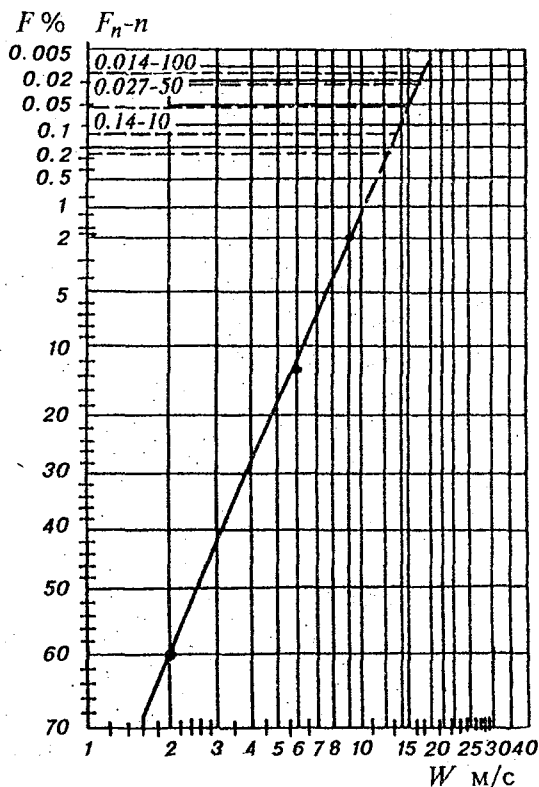


Рис. 1.1. Билогарифмическая сетка для построения кривой распределения скорости ветра.

ра, возможной один раз в то же число лет. Для определения этой максимально возможной скорости ветра вычисляется ее вероятность превышения F_n по формуле

$$F_n = \frac{2500}{N \cdot \Sigma p \cdot n}, \quad (1.2)$$

где N - число дней в году за безледный период; Σp - повторяемость соответствующего направления ветра всех значений скорости; n - заданное число лет.

Разгон X определяется по карте с учетом географического расположения акватории, на которой предполагается строительство гидротехнического сооружения, или по табл. 1.3 [3]. Для предваритель-

Таблица 1.3. Значения предельного разгона ветра

W м/с	20	25	30	40	50
$X \cdot 10^{-3}$ м	1600	1200	600	200	100

ного расчета среднее значение разгона X (м) для скорости ветра W (м/с) согласно, СНИП [3], можно определять по формуле

$$X = k_w \frac{\nu}{W} = 5 \cdot 10^6 \cdot W^{-1}, \quad (1.3)$$

где k_w - коэффициент, принимаемый равным $5 \cdot 10^{11}$; ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха равный $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Исходные данные

1. Район для предполагаемого строительства гидротехнического сооружения.
2. Таблица повторяемости градаций скорости ветра по направлениям для района строительства.

Порядок выполнения работы

1. Составить таблицу повторяемости P и вероятности F превышения градаций скорости ветра по направлениям от числа наблюдений по данным о средней годовой повторяемости скорости ветра для каждого направлении ветра.

Вероятность превышения F (%) определяется путем последовательного суммирования значений P , определенных по формуле (1.1), от боль-

ших значений скоростей к меньшим.

2. Выбрать волноопасные направления ветра для пункта строительства гидротехнического сооружения.

Наиболее волноопасное направление ветра выбирается по данным о повторяемости градаций скорости ветра по направлениям и в зависимости от географического положения и морфологических условий пункта строительства сооружения.

3. Построить кривые распределения скорости ветра на билогарифмической сетке (рис. 1.2).

Кривые распределения скорости ветра строятся для наиболее волноопасных направлений. Для построения кривых распределения на график наносятся точки, соответствующие вероятностям превышения F и первым ступеням градаций скорости ветра. Точки соединяются прямой, наиболее близко расположенной ко всем точкам. Кривые распределения экстраполируются в область малых вероятностей превышения.

4. Определить вероятности превышения максимальных скоростей ветра, возможных один раз в 1, 5, 10, 25, 50 и 100 лет для каждого волноопасного направления ветра.

Вероятности превышения максимальных скоростей ветра определяются по формуле (1.2) для выбранных месяцев года и волноопасных направлений ветра.

5. Определить возможные максимальные скорости ветра за периоды в 1, 5, 10, 25, 50 и 100 лет, используя построенные кривые распределения скорости ветра для волноопасных направлений.

Возможные максимальные скорости ветра определяются по рассчитанным вероятностям превышения F за каждый период.

6. Определить значения предельного разгона ветра.

Предельные разгоны ветра определяются по табл. 1.3 или с использованием формулы (1.3), при этом учитывается географическое положение пункта строительства.

7. Анализ результатов.

При выполнении анализа результатов указать наиболее волноопасное направление ветра и его вероятную скорость за рассматриваемые периоды в данном районе, а также длину его предельного разгона, необходимого для формирования развитого волнения.

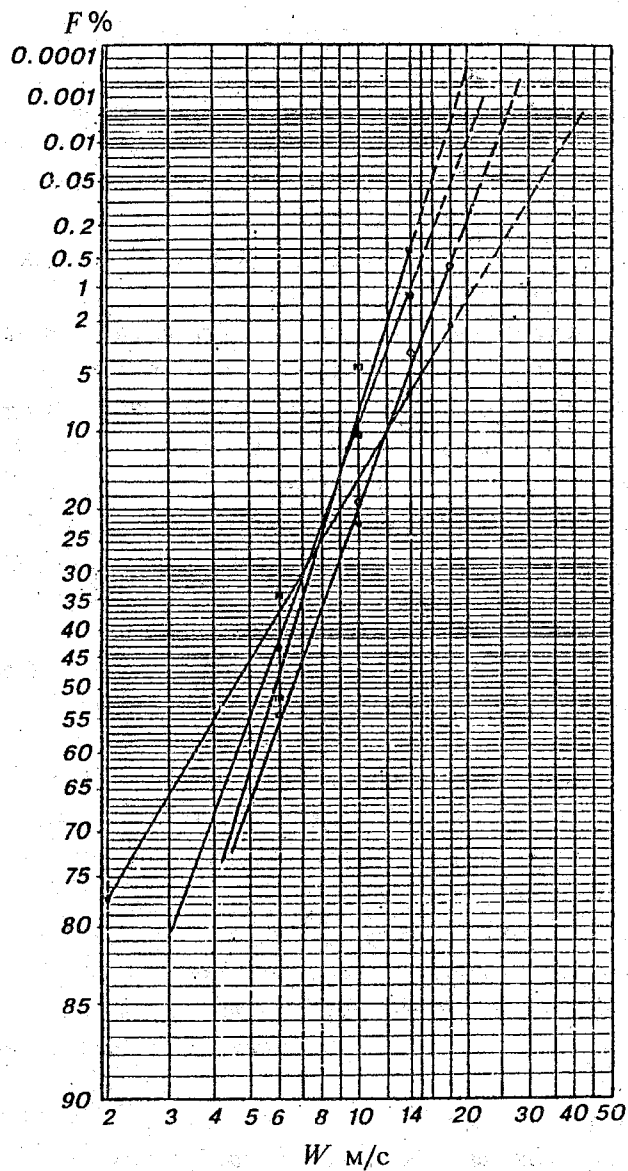


Рис. 1.2. Номограмма для определения максимальной скорости ветра и аппроксимированные прямые для волноопасных направлений ветра.

● - январь, ЮВ; ○ - январь, Ю; □ - октябрь, ЮВ; ■ - октябрь, Ю.

Пример выполнения работы

В а р и а н т - 31

Корф Январь

W м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0-1	0.60	1.00	0.40	2.00	0.70	1.40	1.20	0.20
2-5	3.30	2.40	1.40	3.10	6.70	7.20	4.00	1.80
6-9	3.60	3.30	1.40	1.90	5.60	9.50	3.80	2.40
10-13	3.70	3.00	0.80	1.40	2.60	2.80	2.20	1.70
14-17	2.70	1.00	0.20	0.40	0.50	0.50	0.60	1.70
18-20	1.50	0.50	0.20	0.20	0.10	0.00	0.30	0.90
21-24	0.30	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
25-28	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29-34	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σр	16.80	11.20	4.50	9.00	16.20	21.40	12.20	8.70

Вероятность превышения градаций скорости ветра

W м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0-1	<u>100.00</u> 3.57	<u>100.00</u> 8.93	<u>100.00</u> 8.89	<u>100.00</u> 22.22	<u>100.00</u> 4.32	<u>100.00</u> 6.54	<u>100.00</u> 9.84	<u>100.00</u> 2.30
2-5	<u>96.43</u> 19.64	<u>91.07</u> 21.43	<u>91.11</u> 31.11	<u>77.78</u> 34.44	<u>95.68</u> 41.36	<u>93.46</u> 33.64	<u>90.16</u> 32.79	<u>97.70</u> 20.69
6-9	<u>76.79</u> 21.43	<u>69.64</u> 29.46	<u>60.00</u> 31.11	<u>43.33</u> 21.11	<u>54.32</u> 34.57	<u>59.81</u> 44.39	<u>57.38</u> 31.15	<u>77.01</u> 27.59
10-13	<u>55.36</u> 22.02	<u>40.18</u> 26.79	<u>28.89</u> 17.78	<u>22.22</u> 15.56	<u>19.75</u> 16.05	<u>15.42</u> 13.08	<u>26.23</u> 18.03	<u>49.43</u> 19.54
14-17	<u>33.33</u> 16.07	<u>13.39</u> 8.93	<u>11.11</u> 4.44	<u>6.67</u> 4.44	<u>3.70</u> 3.09	<u>2.34</u> 2.34	<u>8.20</u> 4.92	<u>29.88</u> 19.54
18-20	<u>17.26</u> 8.93	<u>4.46</u> 4.46	<u>6.67</u> 4.44	<u>2.22</u> 2.22	<u>0.62</u> 0.62	<u>0.00</u> 0.00	<u>3.28</u> 2.46	<u>10.34</u> 10.34
21-24	<u>8.33</u> 1.79	<u>0.00</u> 0.00	<u>2.22</u> 2.22	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.82</u> 0.82	<u>0.00</u> 0.00
25-28	<u>6.55</u> 4.17	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00
29-34	<u>2.38</u> 2.38	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00	<u>0.00</u> 0.00

W м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0- 1	0.70	1.80	1.90	1.40	1.70	0.60	0.20	0.00
2- 5	4.40	5.30	5.00	9.30	10.00	6.20	1.50	0.70
6- 9	5.90	3.90	1.50	4.00	11.20	8.70	1.00	0.60
10-13	3.60	1.50	1.00	1.50	1.00	1.50	0.10	0.00
14-17	1.00	0.30	0.07	0.20	0.10	0.00	0.10	0.10
18-20	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
Σp	15.97	12.80	9.47	16.40	24.00	17.00	2.90	1.47

Вероятность превышения градаций скорости ветра

W м/с	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0- 1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	4.38	14.06	20.06	8.54	7.08	3.53	6.90	0.00
2- 5	95.62	85.94	79.94	91.46	92.92	96.47	93.10	100.00
	27.55	41.41	52.80	56.71	41.67	36.47	51.72	47.62
6- 9	68.06	44.53	27.14	34.76	51.25	60.00	41.38	52.38
	36.94	30.47	15.84	24.39	46.67	51.18	34.48	40.82
10-13	31.12	14.06	11.30	10.37	4.58	8.82	6.90	11.56
	22.54	11.72	10.56	9.15	4.17	8.82	3.45	0.00
14-17	8.58	2.34	0.74	1.22	0.42	0.00	3.45	11.56
	6.26	2.34	0.74	1.22	0.42	0.00	3.45	6.80
18-20	2.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76
	2.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76

Январь

Период	ЮВ			Ю		
	F %	W м/с	X км	F %	W м/с	X км
1	0.7610	22.1	226.2	0.4228	18.6	268.8
5	0.1522	28.0	178.6	0.0846	21.0	238.1
10	0.0761	30.8	162.3	0.0423	22.0	227.3
25	0.0304	34.5	144.9	0.0169	23.5	212.8
50	0.0152	36.2	138.1	0.0085	24.4	204.9
100	0.0076	39.0	128.2	0.0042	25.3	197.6

Октябрь

Период	ЮВ			Ю		
	F %	W м/с	X км	F %	W м/с	X км
1	0.4176	15.6	320.5	0.2854	14.4	347.2
5	0.0835	17.6	280.9	0.0571	15.9	314.5
10	0.0418	18.1	276.2	0.0285	16.1	310.6
25	0.0167	19.9	251.3	0.0114	17.0	294.1
50	0.0084	20.0	250.0	0.0057	17.8	280.9
100	0.0042	21.4	233.6	0.0029	18.1	276.2

Литература

1. *Руководство по расчету параметров ветровых волн.* - Л.: Гидрометеоздат, 1969, с. 47-53.
2. *Справочник по климату СССР. Ветер.* - Л.: Гидрометеоздат, 1968.
3. *Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и судовые). СНиП 2.06.04-82.* - М.: Стройиздат, 1983. - 37 с.

Работа № 2

Расчет параметров волн вблизи гидротехнических сооружений и на огражденных акваториях

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой расчета параметров ветрового волнения.
2. Рассчитать параметры волн в глубоководной и мелководной зонах и при их подходе к гидротехническому сооружению.
3. Рассчитать параметры волнения на огражденной волноломом или молом акватории порта.

Расчет параметров волн вблизи гидротехнического сооружения проводится с учетом деления бассейна на глубоководную зону с глубинами, превышающими половину средней длины волны на глубокой воде $\bar{\lambda}_0$, и мелководную зону с глубинами, меньшими $0.5\bar{\lambda}_0$, в пределах которой на формирование волн и их трансформацию оказывает влияние дно. Мелководная зона простирается до глубины начала разрушения волн.

Для случая простых условий волнообразования в глубоководной зоне получены эмпирические зависимости статистических характеристик волнения – средней высоты волны $\bar{h}$, средней длины волны $\bar{\lambda}$ и среднего периода волны $\bar{\tau}$ – от основных волнообразующих факторов: скорости ветра W , длины разгона X и продолжительности действия ветра t_w . На основании этих зависимостей и некоторых теоретических соображений [1–3] построена номограмма для определения параметров волн (рис. 2.1).

При сложных условиях волнообразования средняя высота волны на глубокой воде определяется с помощью функции углового распределения волновой энергии. В мелководной зоне дополнительное влияние на формирование волнения оказывают рельеф дна, конфигурация берегов и донное трение. В результате этого происходит трансформация волн.

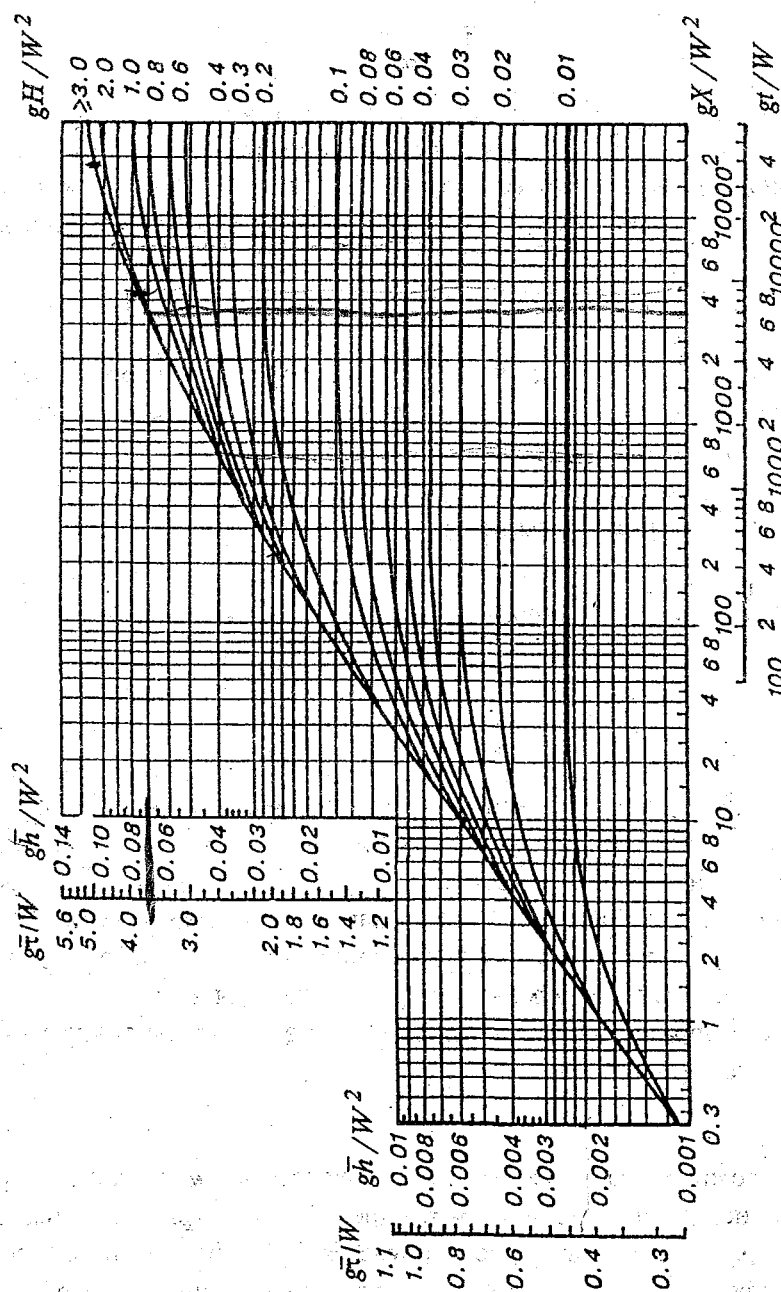


Рис. 2.1. График для определения параметров волн в глубоководной и мелководной зонах.

Средняя длина волны в глубоководной зоне определяется по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{g\bar{t}^2}{2\pi}, \quad (2.1)$$

В основе метода расчета параметров волн в мелководной зоне с учетом их трансформации лежит положение о распространении волновой энергии внутри лучевой трубки. Изменение длины и скорости распространения волны в мелководной зоне описывается выражением

$$\bar{\lambda}_H / \bar{\lambda}_0 = c_H / c_0 = \text{th}(k_H H), \quad (2.2)$$

где $\bar{\lambda}_H$, $\bar{\lambda}_0$, c_H , c_0 – средние длины и скорости распространения волн соответственно на глубине моря H и на глубокой воде; k_H – волновое число, равное $2\pi / \bar{\lambda}_H$.

Изменение высоты волны при ее распространении по мелководью описывается выражением

$$\bar{h}_H / \bar{h}_0 = (l_0 / l_H)^{1/2} \left[\text{th}(k_H H) \cdot \left(1 + \frac{2k_H H}{\text{sh}(2k_H H)} \right) \right]^{1/2} = k_p k_T = k_R, \quad (2.3)$$

$$k_p = (l_0 / l_H)^{1/2}, \quad (2.4)$$

где k_p – коэффициент рефракции, который определяется путем построения карты рефракции и определения расстояния между волновыми лучами (рис. 2.2) на глубокой воде l_0 и в расчетной точке l_H у головы мола на глубине H с использованием номограммы (рис. 2.3); k_T – коэффициент трансформации, определяемый по графику (рис. 2.4); k_R – коэффициент изменения средней высоты волны.

Таким образом, средняя высота волны в расчетной точке с учетом ее трансформации равна

$$\bar{h}_H = k_R \bar{h}_0, \quad (2.5)$$

В сложных условиях волнообразования на мелководье (при неоднородном пространственном распределении ветра или сложной форме береговой черты) рассматривается трансформация спектра волн. Коэффициент k_R в этом случае определяется по формуле:

$$k_R = k_T \left(\sum_{i=1}^n E_i k_{p,i} \right)^{1/2}, \quad (2.6)$$

где E_i – весовой коэффициент i -й составляющей спектра волн на глубокой воде; $k_{p,i}$ – коэффициент рефракции для i -й составляющей спектра волн.

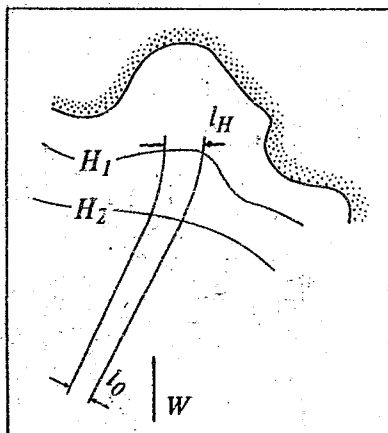


Рис. 2.2. Схема рефракции волнового луча в прибрежной мелководной зоне.

Весовые коэффициенты энергии рассчитываются в соответствии с количеством выбранных при расчете спектральных составляющих углового распределения энергии. При замене функции углового распределения энергии волнения, например пятью составляющими, формула для определения коэффициента k_R имеет вид:

$$k_R = 0.1 k_T \left[32 k_{p,0}^2 + 25 (k_{p,1}^2 + k_{p,-1}^2) + 9 (k_{p,2}^2 + k_{p,-2}^2) \right]^{1/2}, \quad (2.7)$$

где $k_{p,0}$, $k_{p,1}$, $k_{p,-1}$, $k_{p,2}$, $k_{p,-2}$ – коэффициенты рефракции, рассчитанные для направлений, расположенных по отношению к направлению ветра (главного луча) под углами соответственно 0, ± 30 и $\pm 60^\circ$.

Диссипация энергии при распространении волн по мелководью учитывается с помощью обобщенного коэффициента потерь k_n , представленного в табличном виде (табл. 2.1).

Для перехода от средних значений высот волн к высотам i -й обеспеченности (например, при определении волновых нагрузок на гидротехнические сооружения) рассчитываются параметры волн за-

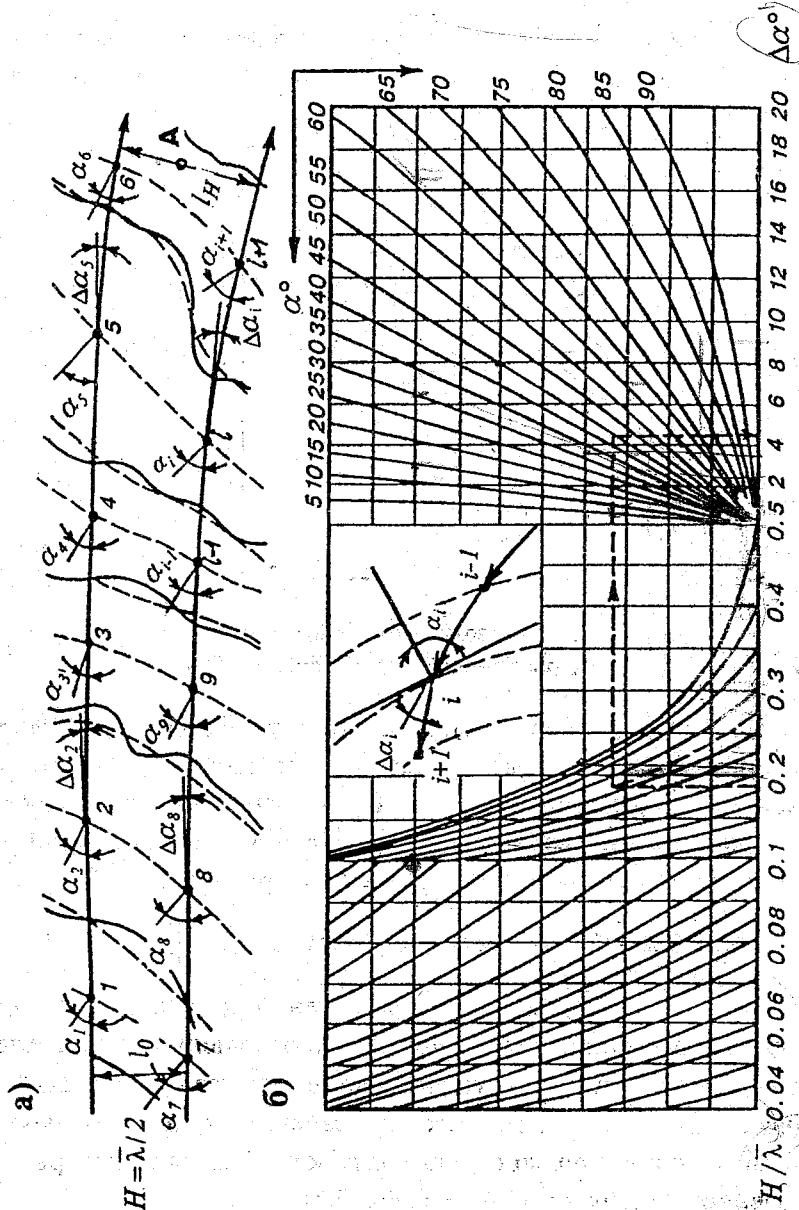


Рис. 2.3. График для построения планов рефракции волн.

данной обеспеченности в зависимости от класса сооружения с использованием коэффициента k_r , определяемого из графика (рис. 2.5).

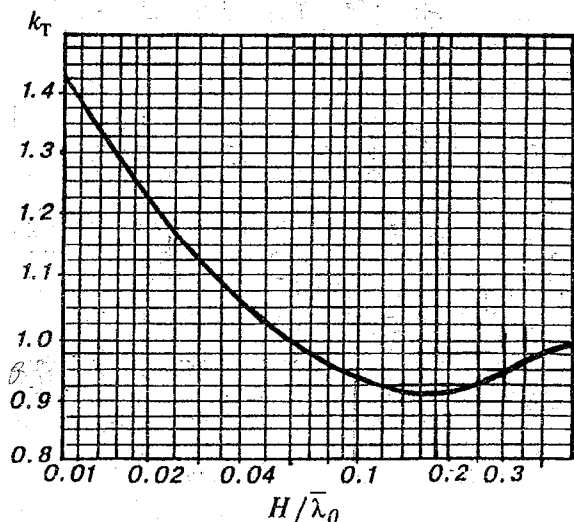


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента трансформации высоты волны от относительной глубины моря.

Таблица 2.1. Значения обобщенного коэффициента потерь k_p при различных значениях уклона дна i .

Относительная глубина $H/\bar{\lambda}_0$	i	
	0.25	0.02-0.002
0.01	0.82	0.66
0.02	0.85	0.72
0.03	0.87	0.76
0.04	0.89	0.78
0.06	0.90	0.81
0.08	0.92	0.84
0.10	0.93	0.86
0.20	0.96	0.92
0.30	0.98	0.95
0.40	0.99	0.98
0.5 и более	1.00	1.00

В результате расчетная волна i -й обеспеченности $h_{i\%}$ на глубине H будет равна

$$h_{i\%} = k_R k_T k_p k_i \bar{h}_0. \quad (2.8)$$

Для определения длины волны используется график, построенный по отношениям $H/\bar{\lambda}_0$ и $h_{i\%}/g\tau^2$ (рис. 2.6).

Волны, достигая гидротехнических сооружений в виде молов и волноломов, огибают их, частично проникая на защищенную акваторию. Огибание волнами препятст-

вий – дифракция волн – приводит к искривлению фронта волны, вдоль которого амплитуды волн уменьшаются в направлении зоны волновой тени. Граница волновой тени (ГВТ) совпадает с лучем волновой волны, проведенным через оконечность мола или волнолома (рис.

$$k_i = h_{i\%} / \bar{h}$$

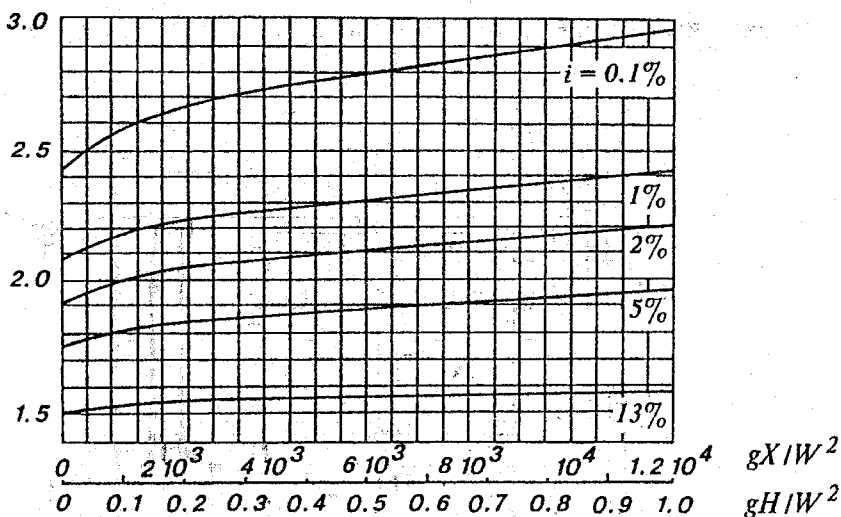


Рис. 2.5. Графики значений коэффициента k_i .

2.7). Граница дифракции волн (ГДВ) оконтуривает зону, в пределах которой волнение на огражденной акватории испытывает влияние защитного сооружения.

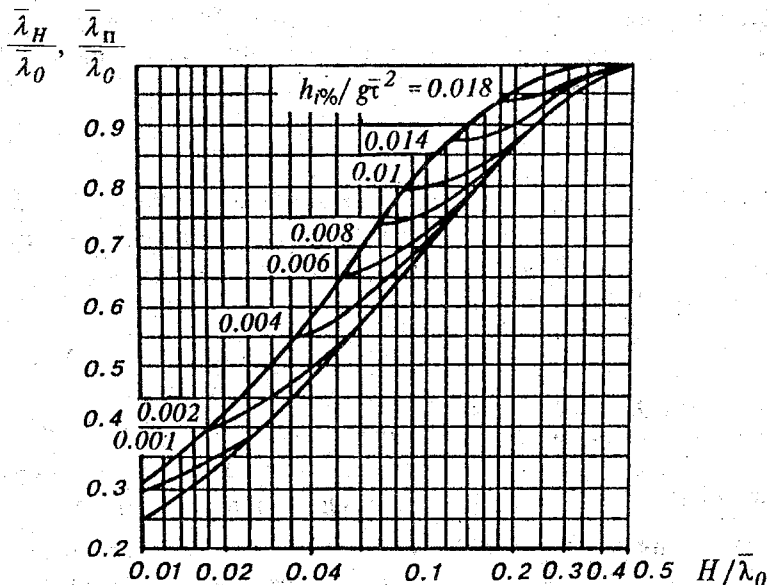


Рис. 2.6. Графики для определения значений λ_H/λ_0 в мелководной зоне.

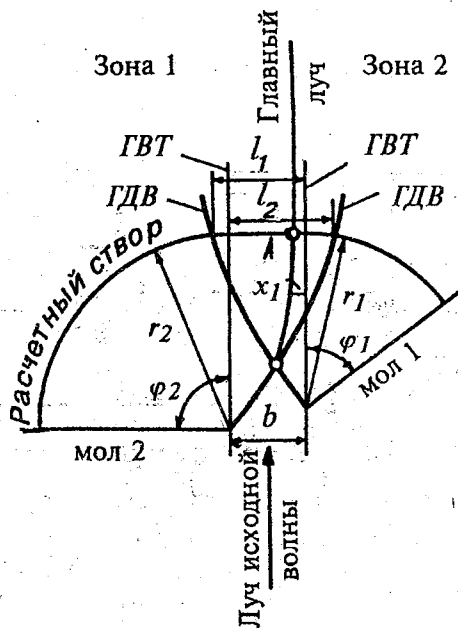


Рис. 2.7. Схема определения границы волной тени (ГВТ) и границы дифракции волн (ГДВ).

Высота дифрагированной волны на акватории, огражденной диночным молом, определяется с учетом коэффициента дифракции

$$h_d = k_d h_i, \quad (2.9)$$

где h_i – высота волны i -й обеспеченности у головы мола; k_d – коэффициент дифракции волн, определяемый по графику (рис. 2.9).

Высота дифрагированной волны на акватории, огражденной соходящимися молами (см. рис. 2.7), определяется также по формуле (2.8), но так как картина распространения волн в этом случае значительно сложнее, коэффициент дифракции k_{dc} определяется по формуле

$$k_{dc} = k_d \psi, \quad (2.10)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий одновременное влияние сходящихся молв на распространение волн на огражденной акватории и определяемый по графику (рис. 2.9) по данным значений d и k_d^* определяемого так же, как и k_d для точки пересечения главного луча

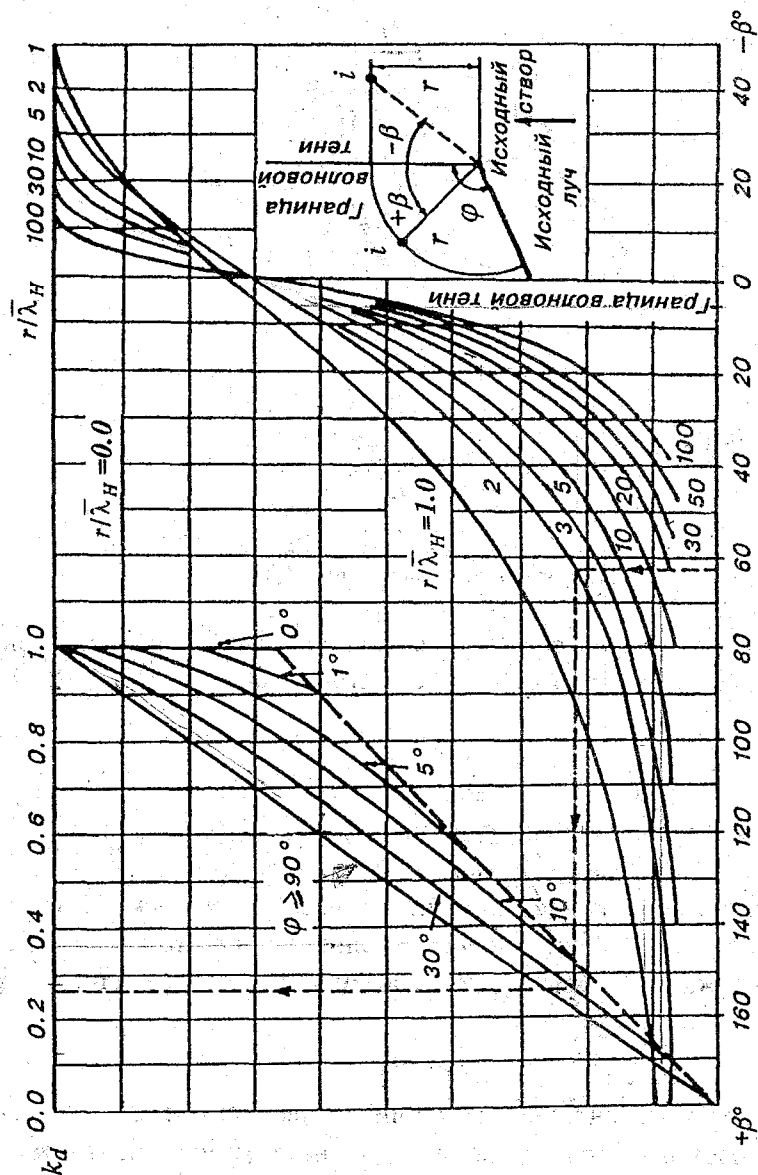


Рис. 2.8. График для определения значений коэффициента дифракции k_d .

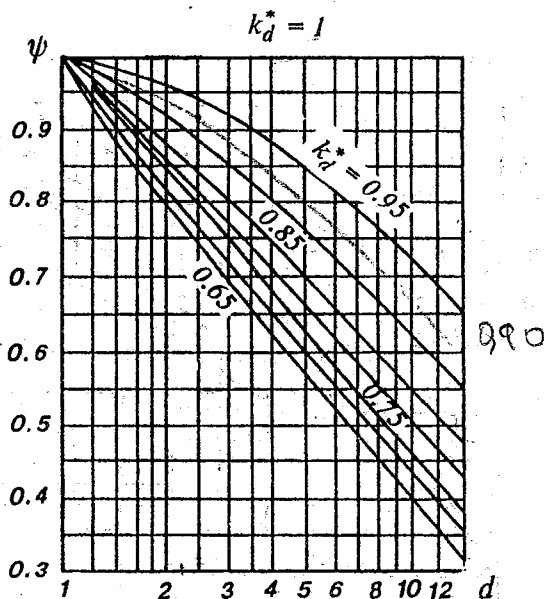


Рис. 2.9. Графики для определения коэффициента ψ .

с фронтом волны в расчетном створе). Значение d определяется по формуле

$$d = \frac{l_1 + l_2 + b}{2b}, \quad (2.11)$$

где l_1 и l_2 – расстояния от границ волновой тени до границ дифракции волн, определяемые по относительным величинам r/λ_H и углу φ (см. рис. 2.7); b – ширина входа в порт, принимаемая равной проекции расстояния между головами молв на фронт исходной волны; r – расстояние от головы мола до расчетного створа.

Для определения коэффициента k_d^* рассчитывается положение главного луча на огражденной акватории по точкам, откладываемым от границ волновой тени мола с меньшим углом (между линией TBT и молем) на расстояниях x (см. рис. 2.7) [3]:

$$k_d^* = \frac{l_1 l'_1 - \frac{1}{2}(l_2 - b)}{l_1 + l_2}, \quad (2.12)$$

где l'_1 и l'_2 – коэффициенты, определяемые по графикам (рис. 2.10).

Коэффициент дифракции для акватории, огражденной одиноч-

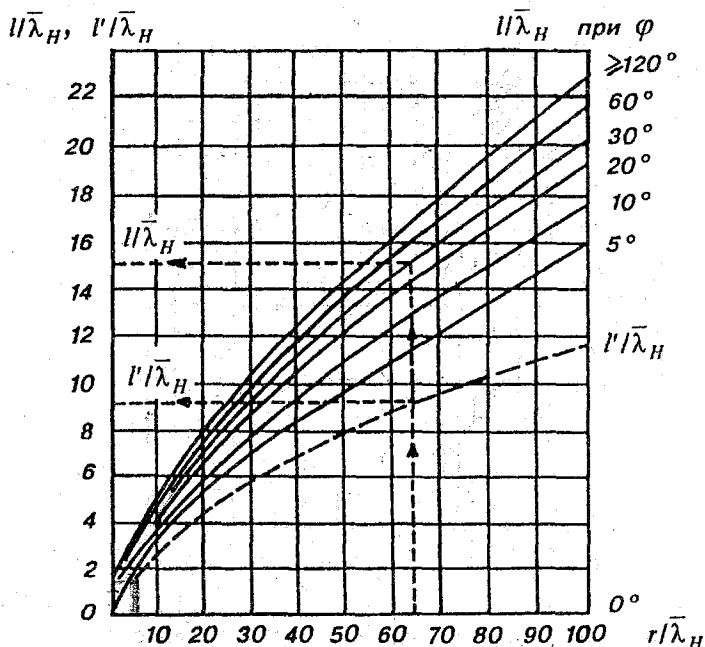


Рис. 2.10. График для определения величин l и l' .

ным волноломом k_{dB} , в зоне влияния правой и левой его оконечностей определяется по формуле

$$k_{dB} = \sqrt{(k_{dr}^2 + k_{dl}^2)}, \quad (2.13)$$

где k_{dr} и k_{dl} – коэффициенты дифракции волн, определяемые соответственно для правого и левого участков волнолома, как элементов одиночного мола.

Таким образом, в результате выполнения настоящей работы необходимо получить параметры волн в расчетных точках около гидротехнического сооружения с внешней его стороны (со стороны открытого моря), на огражденной акватории и высоту дифрагированной волны у волнолома.

Исходные данные

1. Скорость W (м/с) и направление ветра в районе порта или гидротехнического сооружения (по результатам работы № 1).
2. Максимальный разгон ветра X (км) (из работы № 1).
3. Глубина моря у сооружения и на огражденной акватории (м).

Порядок выполнения работы

1. Определить параметры волн в глубоководной зоне.

Средняя высота $\bar{h}_0$ (м) и средний период волн $\bar{\tau}$ (с) в глубоководной зоне определяются по верхней огибающей кривой номограммы (см. рис. 2.1) по известным значениям величин gt_w/W и gX/W^2 . По наименьшему значению $g\bar{h}_0/W^2$ и $g\bar{\tau}/W$ принимается средняя высота и средний период волн (длина разгона X (км), скорость ветра W (м/с), а продолжительность действия ветра t_w (ч)). Средняя длина $\bar{\lambda}_0$ (м) рассчитывается по формуле (2.1) по известному значению $\bar{\tau}$.

2. На карте прибрежной акватории, с расположенным на ней молом (сходящимися молами) или волноломом, выделить границу глубоководной и мелководной зон.

Граница мелководной зоны выделяется по изобате соответствующей $0.5 \bar{\lambda}_0$.

3. Построить планы рефракции для лучей, проведенных из расчетной точки вблизи головы мола в направлениях $\pm 30^\circ$ и $\pm 60^\circ$ от главного луча, совпадающего с направлением ветра.

3.1. Провести на карте акватории, прилегающей к порту, в открытой части моря основные изобаты (не менее 4–5) и промежуточные между ними.

3.2. Из расчетной точки у головы мола провести пять прямых линий: по направлению ветра (главный луч) и под углами $\pm 30^\circ$ и $\pm 60^\circ$. Для каждого из пяти направлений строится карта рефракции в виде пары волновых лучей, выходящих из концов отрезка l_0 , нанесенного на границе мелководья и глубоководной зоны (построение карты рефракции выполняется независимо для каждого луча).

3.3. Из исходной точки на границе глубоководной и мелководной зон провести прямые линии (начало волнового луча) параллельно выбранному направлению и определить угол между ними и нормалью к первой промежуточной изобате.

3.4. Определить угол поворота волнового луча $\Delta\alpha$ в точке его пересечения с первой промежуточной изобатой. Входными параметрами для определения угла $\Delta\alpha$ служат отношения $H_1/\bar{\lambda}_0$ и $H_2/\bar{\lambda}_0$ (H_1 и H_2 – значения соседних изобат).

Величина первого поворота $\Delta\alpha_1$ определяется следующим образом. Из точки на нижней шкале номограммы (см. рис. 2.3), отвечающей значению $H_2/\bar{\lambda}_0$, проводят вертикальную прямую до кривой, соответ-

вующей значению $H_1/\bar{\lambda}_0$. Через точку пересечения проводится горизонтальная линия вправо до кривой, соответствующей значению угла α_0 . Из этой точки пересечения опускается перпендикуляр на нижнюю шкалу, по которой и получают значение искомого угла поворота $\Delta\alpha_1$. Волновой луч поворачивают на угол $\Delta\alpha_1$ в сторону меньших глубин, приняв за центр поворота точку пересечения луча с первой промежуточной изобатой. Повернутый таким образом луч продлевается до пересечения со второй промежуточной изобатой (между изобатами H_1 и H_2) и далее определяются углы $\Delta\alpha_2$ и т.д.

3.5. Определить α'_1 , α'_2 и $\Delta\alpha'_1$, $\Delta\alpha'_2$ на каждой изобате до головы мола и провести лучи, выходящие из концов отрезка l_0 .

4. Определить коэффициенты рефракции k_R для всех лучей.

Для определения коэффициентов рефракции используется формула (2.4) и построенные планы рефракции (см. рис. 2.11 и 2.12 примера выполнения работы).

5. Определить коэффициент трансформации k_T .

Коэффициент трансформации определяется с использованием графика (см. рис. 2.4) по известному отношению $H/\bar{\lambda}_0$.

6. Определить коэффициент изменения средней высоты волны k_R .

Коэффициент изменения средней высоты волны рассчитывается по формуле (2.7) для всех лучей.

7. Определить обобщенный коэффициент потерь k_n .

Коэффициент k_n определяется с использованием табл. 2.1 по уклону дна i (определяется по карте района) и отношению $H/\bar{\lambda}_0$.

8. Определить коэффициент k_i .

По безразмерным величинам gH/W^2 и $g\bar{X}/W^2$ находят наименьшее значение коэффициента k_i для волн 1%-ной обеспеченности (см. рис. 2.5).

9. Определить в расчетной точке у головы мола (волнолома) высоту волны 1%-ной обеспеченности $h_{1\%}$ и ее среднюю длину $\bar{\lambda}_H$.

Высота волны $h_{1\%}$ рассчитывается по формуле (2.8), а длина волны у головы мола $\bar{\lambda}_H$ с использованием графика (рис. 2.6) при заданных безразмерных величинах $H/\bar{\lambda}_0$ и $h_{1\%}/g\bar{\tau}^2$.

10. Для расчетных точек на огражденной акватории определить коэффициенты дифракции волн k_d (см. рис. 2.13 примера выполнения работы).

10.1. Коэффициенты дифракции определяются по графикам (см. рис.

2.8) для 5–6 точек, равномерно расположенных на огражденной акватории.

Величина k_d определяется при заданных значениях угла β° , относительного расстояния от головы мола до точки в расчетном створе $r/\bar{\lambda}_H$ и угла φ° .

10.2. Коэффициент дифракции волн k_{dc} для акватории, огражденной сходящимися молами, определяется по формуле (2.10); предварительно определяются следующие характеристики:

а) границы волновой тени для обоих молов (мола или волнолома): через головы молов проводятся прямые, параллельные лучу исходной волны (см. рис. 2.7);

б) углы между границами волновой тени и осями молов φ_1 и φ_2 ;

в) границы дифракции волн для обоих молов (мола или волнолома): через точки на акватории порта проводятся расчетные створы, границы волновой тени на которых соединяются между прямыми линиями, проведенными по нормали к главному лучу. По относительным расстояниям $r_1/\bar{\lambda}_H$, $r_2/\bar{\lambda}_H$ и углам φ_1 и φ_2 определяются значения относительных величин $l_1/\bar{\lambda}_H$ и $l_2/\bar{\lambda}_H$ по графику (рис. 2.10). По значениям $l_1/\bar{\lambda}_H$ и $l_2/\bar{\lambda}_H$ определяются расстояния от границ волновой тени до границ дифракции волн l_1 и l_2 для всех точек на каждом расчетном створе (см. рис. 2.13). Соединить полученные точки и построить таким образом границы дифракции волн для каждого мола;

г) положение главного луча на акватории порта.

Для определения положения главного луча на акватории порта следует по штриховой линии графика (рис. 2.10) для отношений $r_1/\bar{\lambda}_H$ и $r_2/\bar{\lambda}_H$ определить значения величин $l_1/\bar{\lambda}_H$, $l_2/\bar{\lambda}_H$, l_1 и l_2 .

По формуле (2.12) и значениям величин l_1 , l_2 , l_1 , l_2 и b (расстояние между головами молов) определяются на каждом створе значения x . Положение главного луча принимается по точкам, расположенным от границы волновой тени мола с меньшим углом φ на расстояниях x на каждом расчетном створе;

д) коэффициент дифракции k_d^* для точек, расположенных на главном луче, используя графики (рис. 2.8).

Величина k_d^* определяется по известным величинам $r/\bar{\lambda}_H$, φ и углам β между ГВТ выбранного мола и направлением лучей от головы мола на точки, расположенные на каждом из расчетных створов по главному лучу на расстояниях x от ГВТ этого же мола;

е) поправочный коэффициент ψ для расчета величины k_{dc} .

По рассчитанному значению d (формула (2.11) и величины l_1 , l_2 , b и k_d^*) с использованием графика (см. рис.2.9) определяется значение ψ ;

ж) значение коэффициента дифракции k_d .

Значение коэффициента дифракции волн k_d (см. рис. 2.8) определяется для точек на акватории порта в зависимости от их положения относительно главного луча, т.е. по известным величинам $r/\bar{\lambda}_H$, φ и β того мола, под влиянием которого находится расчетная точка.

10.3. Коэффициент дифракции волн для отдельно стоящего волнолома $k_{дв}$ определяется относительно обоих концов волнолома с использованием графика (см. рис. 2.8), а в зоне влияния левого и правого концов волнолома общий коэффициент дифракции рассчитывается по формуле (2.13).

11. Определить высоту дифрагированной волны в расчетных точках на акватории порта и в точке у мола, находящейся с противоположной стороны от подходящей к голове мола волны, и провести изолинии высот дифрагированных волн на акватории порта.

Высота дифрагированной волны определяется по рассчитанным значениям, входящим в формулу (2.8).

12. Анализ результатов.

а) Выполнить анализ полученных характеристик волнения в расчетных точках около сооружения как с внешней стороны, так и на огражденной акватории порта.

б) Описать влияние волнообразующих факторов на формирование волн в глубоководной зоне.

в) Оценить роль рефракции и трансформации волн в мелководной зоне и дифракции волн на огражденной акватории порта.

г) Дать оценку волнозащитного эффекта сооружения.

Пример выполнения работы

1. Порт защищен одиночным молот.

Порт	Элизабет
Скорость ветра	$W = 20$ м/с
Направление ветра	Восточное
Максимальный разгон	$X = 300$ км
Глубина моря у головы мола	$H = 11$ м

1. Определение параметров волн в глубоководной зоне:

$$\frac{X}{W^2} \cdot 10^3 = 750; \quad \frac{\bar{\tau}}{W} = 0.42; \quad \frac{\bar{h}_0}{W^2} = 0.0081;$$

$$\bar{\tau} = 8.4 \text{ с}; \quad \bar{h}_0 = 3.24 \text{ м}; \quad \bar{\lambda}_0 = 112 \text{ м}.$$

2. Построение плана рефракции волн (табл. 2.2, рис. 2.11):

Таблица 2.2. Расчет углов поворота луча волны ($\bar{\lambda}_0 = 112 \text{ м}$)

№ изобат	Направление луча	$H_{i-1}/\bar{\lambda}_0$	$H_i/\bar{\lambda}_0$	α'_0 °	α''_0 °	$\Delta \alpha'_0$ °	$\Delta \alpha''_0$ °
0-1	+60°	0.179	0.161	38	38	1.0	1.0
	+30	0.179	0.161	9	9	0.5	0.2
	0	0.179	0.161	14	17	0.5	0.6
	-30	0.179	0.161	67	64	2.8	2.4
	-60	0.179	0.161	-	-	-	-
1-2	+60	0.161	0.143	50	54	2.8	3.0
	+30	0.161	0.143	2	4	0.1	0.1
	0	0.161	0.143	22	28	0.9	1.2
	-30	0.161	0.143	62	64	4.1	4.4
	-60	0.161	0.143	-	-	-	-
2-3	+60	0.143	0.125	32	31	1.2	1.3
	+30	0.143	0.125	6	1	0.4	0.0
	0	0.143	0.125	23	28	0.9	1.1
	-30	0.143	0.125	62	62	4.2	4.2
	-60	0.143	0.125	-	-	-	-
3-4	+60	0.125	0.107	17	19	1.2	1.3
	+30	0.125	0.107	16	15	0.4	0.0
	0	0.125	0.107	45	44	0.9	1.1
	-30	0.125	0.107	61	63	4.2	4.2
	-60	0.125	0.107	-	-	-	-
4-5	-60	0.107	0.093	59	69	6.1	8.7

3. Определение коэффициентов k_p (табл. 2.3):

Таблица 2.3. Расчет коэффициентов рефракции

Направление луча	l_0 мм	l_H мм	k_p^2	k_p
+60°	3.5	4.1	0.854	0.92
+30	3.5	5.8	0.603	0.78
0	3.5	6.1	0.574	0.76
-30	3.5	7.3	0.479	0.69
-60	-	-	-	-

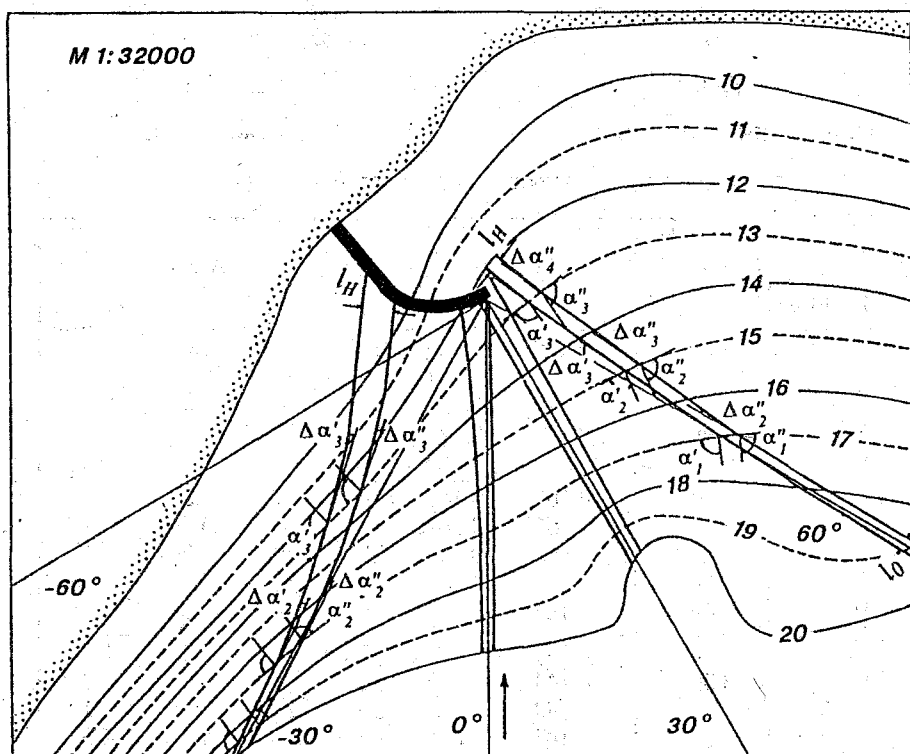


Рис. 2.11. Схема построения планов рефракции волн для акватории, огражденной одиночным молом.

4. $H/\bar{\lambda}_0 = 0.098$; $k_T = 0.94$.

5. $k_R = 0.1 \cdot 0.94 [32 \cdot 0.72^2 + 25(0.78^2 + 0.69^2) + 9 \cdot 0.92^2]^{1/2} = 0.68$.

6. $i = 0.0036$; $k_H = 0.86$.

7. $(gH/W^2) = 0.3$; $(gX/W^2) = 7500$; $k_i = 2.08$; $k_f = 2.34$.

8. $h_{1\%} = 0.68 \cdot 0.94 \cdot 0.86 \cdot 2.08 \cdot 3.24 = 3.70 \text{ м.}$

$H/\bar{\lambda}_0 = 0.098$; $h_{1\%}/g\bar{\tau}^2 = 0.0057$; $\bar{\lambda}_H/\bar{\lambda}_0 = 0.7$; $\bar{\lambda}_H = 78.4 \text{ м.}$

9. Расчет коэффициентов дифракции и высот волн на акватории, ог-
ражденной одиночным молом (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Расчет коэффициентов дифракции и высот
дифрагированной волны

№ точек	β°	r м	$r/\bar{\lambda}_H$	φ°	k_d	h_d м
1	63	288	3.7	104	0.16	0.64
2	94	272	3.5	104	0.10	0.40
3	96	464	5.9	104	0.06	0.24
4	54	480	6.1	104	0.16	0.64
5	87	608	7.8	104	0.08	0.32
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
20	26	1187	15.1	104	0.28	1.12

1. Порт защищен сходящимися молом.

Порт	<i>Лос-Анджелес</i>
Скорость ветра	$W = 25$ м/с
Направление ветра	<i>Южное</i>
Максимальный разгон	$X = 250$ км
Глубина моря у головы мола	$H = 14$ м

1. Определение параметров волн в глубоководной зоне:

$$\frac{X}{W^2} \cdot 10^3 = 400; \quad \frac{\bar{\tau}}{W} = 0.379; \quad \frac{\bar{h}_0}{W^2} = 0.0065;$$

$$\bar{\tau} = 9.5 \text{ с}; \quad \bar{h}_0 = 4.06 \text{ м}; \quad \bar{\lambda}_0 = 140.6 \text{ м}.$$

2. Построение плана рефракции волн (табл. 2.5, рис. 2.12):

Таблица 2.5. Расчет углов поворота луча волны ($\bar{\lambda}_0 = 140.6$ м)

№ изобат	Направ- ление луча	$H_{i-1}/\bar{\lambda}_0$	$H_i/\bar{\lambda}_0$	α'_0°	α''_0°	$\Delta \alpha'_0^\circ$	$\Delta \alpha''_0^\circ$
0-1	+60°	0.171	0.156	27	40	0.8	1.2
	+30	0.171	0.156	20	10	0.6	0.4
	0	0.171	0.156	24	25	0.9	0.9
	-30	0.171	0.156	25	24	0.9	0.9
	-60	0.171	0.156	-	-	-	-

1-2	+60	0.156	0.142	18	21	0.4	0.5
	+30	0.156	0.142	88	19	1.1	0.5
	0	0.156	0.142	15	12	0.4	0.3
	-30	0.156	0.142	22	21	0.6	0.6
	-60	0.156	0.142	63	66	2.9	3.1
2-3	+60	0.142	0.128	22	22	1.0	1.0
	+30	0.142	0.128	22	12	1.0	0.5
	0	0.142	0.128	8	9	0.3	0.3
	-30	0.142	0.128	19	21	0.8	0.9
	-60	0.142	0.128	60	60	3.6	3.6
3-4	+60	0.128	0.114	22	23	1.1	1.1
	+30	0.128	0.114	21	8	1.0	0.5
	0	0.128	0.114	6	7	0.3	0.3
	-30	0.128	0.114	20	19	1.0	0.9
	-60	0.128	0.114	63	60	4.7	4.1
4-5	+60	0.114	0.099	16	18	0.5	0.6
	+30	0.114	0.099	7	7	0.2	0.2
	0	0.114	0.099	12	24	0.4	0.8
	-30	0.114	0.099	19	21	0.7	0.7
	-60	0.114	0.099	42	42	1.4	1.4

3. Определение коэффициентов k_p (табл. 2.6):

Таблица 2.3. Расчет коэффициентов рефракции

Направление луча	l_0 мм	l_H мм	k_p^2	k_p
+60°	4.0	4.2	0.95	0.98
+30	4.0	3.4	1.18	1.08
0	4.0	4.5	0.89	0.94
-30	4.0	4.9	0.82	0.90
-60	4.0	6.1	0.66	0.81

4. $H/\bar{\lambda}_0 = 0.0996$; $k_T = \mathbf{0.936}$.

5. $k_R = 0.1 \cdot 0.936 [32 \cdot 0.94^2 + 25(1.08^2 + 0.90^2) + 9(0.92^2 + 0.81^2)]^{1/2} = \mathbf{0.899}$.

6. $i = 0.0037$; $k_H = \mathbf{0.86}$.

7. $(gH/W^2) = 0.224$; $(gX/W^2) = 4000$; $k_i = 2.27$; $k_i = \mathbf{2.24}$.

8. $h_{I\%} = 0.936 \cdot 0.899 \cdot 0.86 \cdot 2.24 \cdot 4.06 = \mathbf{6.58 \text{ м}}$.

$H/\bar{\lambda}_0 = 0.0996$; $h_{I\%}/g\tau^2 = 0.0073$; $\bar{\lambda}_H/\bar{\lambda}_0 = 0.74$; $\bar{\lambda}_H = \mathbf{104.0 \text{ м}}$.

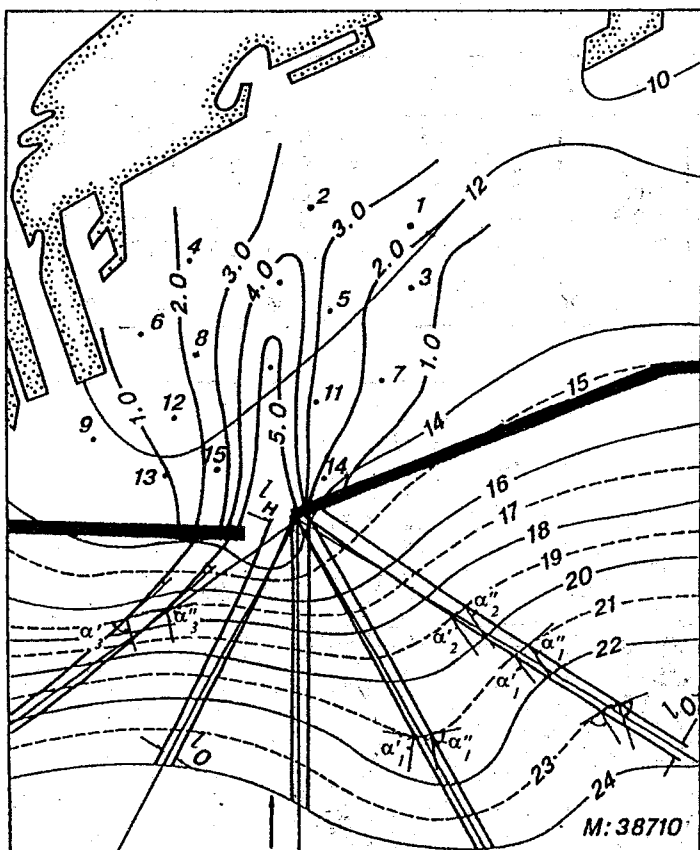


Рис. 2.12. Схема построения планов рефракции и высоты дифрагированных волн для акватории, огражденной сходящимися молами.

9. Расчет k_d и h_d (табл. 2.7, рис. 2.12, 2.13):

Таблица 2.7. Расчет коэффициентов дифракции и высот дифрагированной волны на огражденной акватории

№	$\frac{r_1}{\lambda_H}$	$\frac{r_2}{\lambda_H}$	$\frac{l_1}{\lambda_H}$	$\frac{l_2}{\lambda_H}$	$l_1 \text{ м}$	$l_2 \text{ м}$	$\frac{l'_1}{\lambda_H}$	$\frac{l'_2}{\lambda_H}$	$l'_1 \text{ м}$	$l'_2 \text{ м}$
1	27.3	28.8	9.7	10.2	1008.8	1060.8	5.5	5.7	572.0	592.8
2	27.3	28.8	9.7	10.2	1008.8	1060.8	5.5	5.7	572.0	592.8
3	22.9	19.8	8.6	9.1	894.4	946.4	4.9	5.1	509.6	530.4
4	22.9	19.8	8.6	9.1	894.4	946.4	4.9	5.1	509.6	530.4
5	18.5	19.8	7.5	7.9	780.0	821.6	4.2	4.4	436.8	457.6
15	4.2	5.7	3.3	3.7	343.2	384.8	1.6	1.8	166.4	187.2

№	x м	β°	k_d^*	β_1'	β_2'	k_d	d	ψ	k_{dc}	h_d м
1	220.8	-4	0.81	53		0.11	2.7	0.80	0.088	0.58
2	220.8	-4	0.81		4	0.66	2.7	0.80	0.528	3.47
3	220.3	-5	0.81	30		0.22	2.5	0.83	0.183	1.20
4	220.3	-5	0.81		12	0.40	2.5	0.83	0.332	2.18
5	224.9	-5	0.81	12		0.45	2.5	0.87	0.392	2.58
15	219.4	-26	0.81		24	0.36	1.3	0.99	0.356	2.34

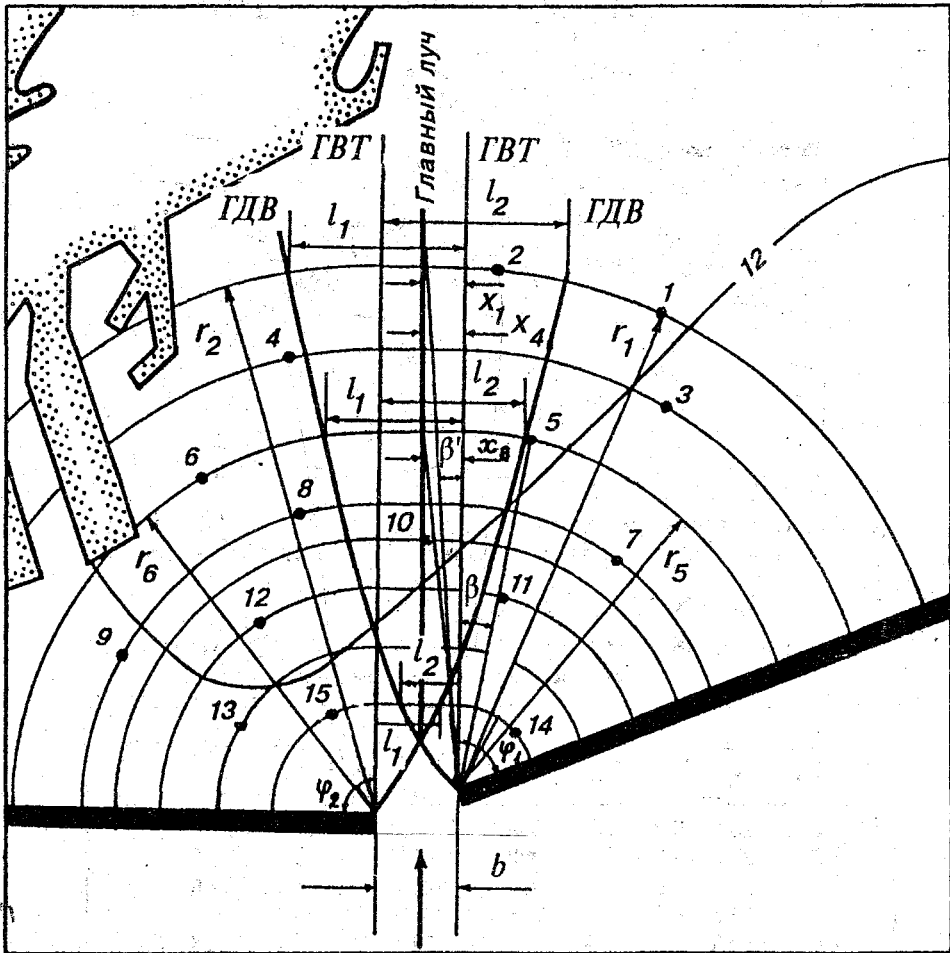


Рис. 2.13. Построение границ дифракции волн и направления главного луча.

Литература

1. *Руководство по расчету параметров ветровых волн*. - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 138 с.

2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. - Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. - 432 с.

3. *Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и судовые)*. СНиП 2.06.04-82. - М.: Стройиздат, 1989. - 40 с.

Работа № 3

Расчет давления волн и волновых нагрузок на сооружения вертикального профиля

Задачи работы

1. Ознакомиться с методами расчета давления волн различного типа и волновых нагрузок от них на сооружения вертикального профиля.
2. Рассчитать давление волн и значения горизонтальных и вертикальных нагрузок со стороны открытого моря и со стороны огражденной акватории.
3. Составить уравнение моментов сил для оценки устойчивости сооружения и определения его минимальной ширины, достаточной для сохранения его устойчивости.

Волны, формирующиеся около гидротехнических сооружений, оказывают на них динамическое воздействие, характер которого зависит от глубины места, места расположения сооружения в прибрежной зоне и его конструктивных особенностей. В качестве волнозащитных сооружений наиболее широко используются молы и волноломы типа вертикальной стенки, вблизи которых формируются в зависимости от морфометрических условий и размеров составляющих конструкции сооружений стоячие, разбивающиеся или прибойные волны.

Таким образом, характер волнения или тип подходящей волны вблизи сооружения зависит от его конструкции и расположения, а также от соотношения высоты подходящей волны $\bar{h}$, глубины моря H и глубины над бермой сооружения H_6 (рис. 3.1). При соотношениях $H > 1.5\bar{h}$ и $H_6 \geq 1.25\bar{h}$ у вертикальной стенки формируются стоячие волны, при $H \geq 1.5\bar{h}$ и $H_6 < 1.25\bar{h}$ – разбивающиеся волны, а при $H \leq H_{кр}$ ($H_{кр} < 0.7\bar{h}$) – прибойные волны. Нагрузки от всех типов волн на один погонный метр стенки определяются по площадям эпюр горизонтальных и вертикальных составляющих давления, рас-

считанных в характерных точках боковой поверхности сооружения и его основания (рис. 3.2).

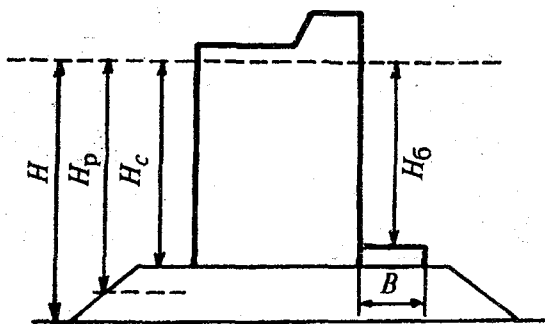


Рис. 3.1. Схема волнолома с вертикальной стенкой.

При расчете давления на вертикальную стенку от стоячих волн используется условная расчетная глубина H_p (м), равная

$$H_p = H_c + k_6(H - H_c), \quad (3.1)$$

где H_c — глубина над подошвой сооружения, м (см. рис. 3.1); k_6 — коэффициент, принимаемый по графику (рис. 3.3).

Отклонение свободной поверхности моря η (м) у вертикальной стенки от расчетного уровня при подходе стоячей волны определяется по формуле

$$\eta = -\bar{h} \cos(\omega t) - \frac{k_H \bar{h}^2}{2} \operatorname{cth}(k_H H) \cos^2(\omega t), \quad (3.2)$$

где $\omega = 2\pi/\tau$ — частота волны (с^{-1}); τ — период волны (с); t — время (с); $k_H = 2\pi/\bar{\lambda}_H$ — волновое число; $\bar{\lambda}_H$ — средняя длина волны около сооружения (м).

Для максимального значения волновой нагрузки при подходе гребня волны величина $\cos(\omega t)$ принимается равной

$$\cos(\omega t) = \frac{\bar{\lambda}_H}{\pi \bar{h} \left[8\pi \frac{H}{\bar{\lambda}_H} - 3 \right]}, \quad (3.3)$$

а для максимального значения волновой нагрузки при подходе подошвы стоячей волны

$$\cos(\omega t) = -1. \quad (3.4)$$

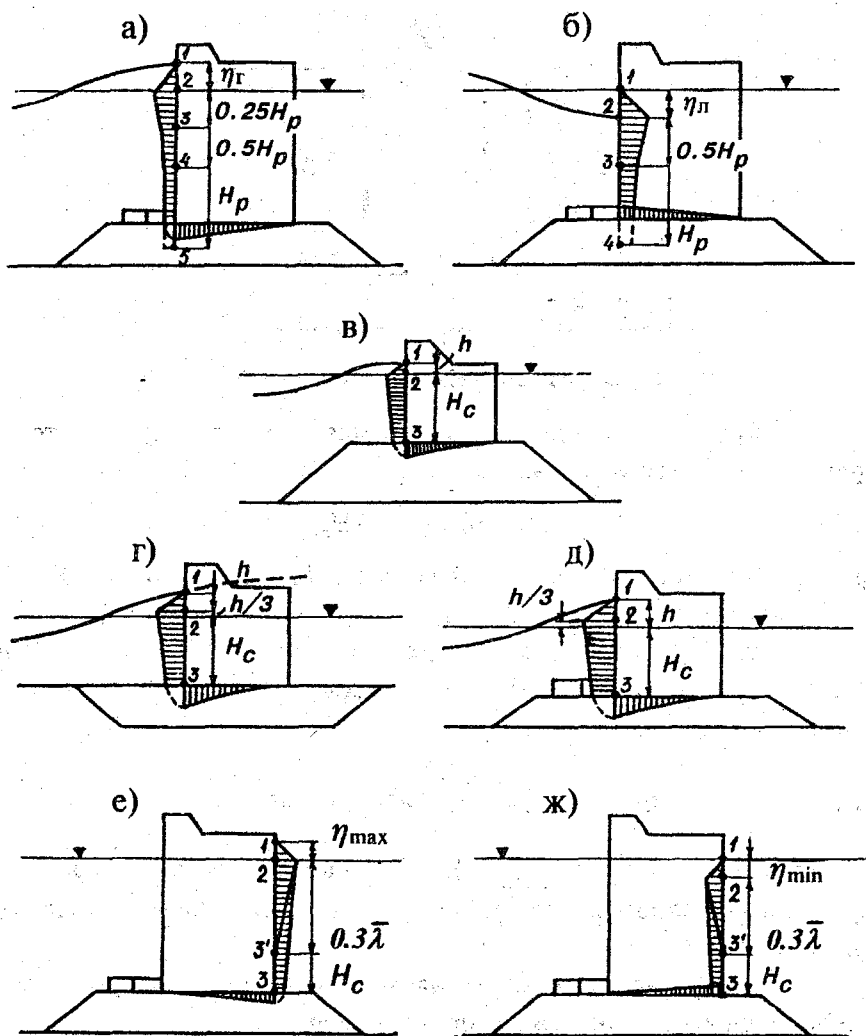


Рис. 3.2. Эпюры волнового давления от воздействия волн на вертикальную стенку.
а, б - стоячих волн; в - разбивающихся; г, д - прибойных волн со стороны открытого моря; е, ж - дифрагированных волн со стороны огражденной акватории.

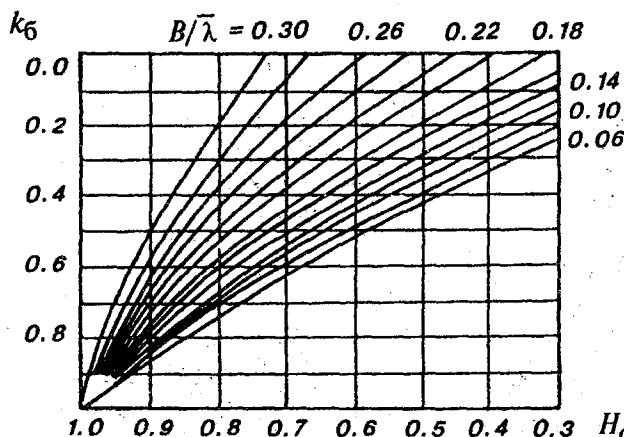


Рис. 3.3. График для определения значений коэффициента k_6 .

В глубоководной зоне горизонтальная составляющая давления на вертикальную стенку определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 P = & \rho g \bar{h} \exp(-k_H z) \cos(\omega t) - \rho g \frac{k_H \bar{h}^2}{2} \exp(-2k_H z) \cos^2(\omega t) - \\
 & - \rho g \frac{k_H \bar{h}^2}{2} [1 - \exp(-2k_H z)] \cos(2\omega t) - \\
 & - \rho g \frac{k_H^2 \bar{h}^3}{2} \exp(-3k_H z) \cos(2\omega t) \cos(\omega t), \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

где ρ – плотность воды, равная 1026 кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, равное 9.81 м/с^2 ; z – ординаты точек на боковой поверхности стенки, отсчитываемые от расчетного уровня, м (вверх от расчетного уровня знак “–”, вниз – “+”).

В мелководной зоне горизонтальная составляющая волнового давления со стороны открытого моря от воздействия стоячих волн на глубине z рассчитывается по формулам табл. 3.1. Значения коэффициентов k_2, k_3, k_4, k_5, k_8 и k_9 в формулах табл. 3.1 определяются по графикам (рис. 3.4).

Расчет горизонтальной линейной нагрузки F (кН/м) от воздействия на сооружение типа вертикальной стенки разбивающихся волн производится при глубине над бермой $H_6 < 1.25 \bar{h}$ и глубине моря у сооружения $H \geq 1.5 \bar{h}$ также по площади эпюры волнового давления, рассчитанного по трем точкам:

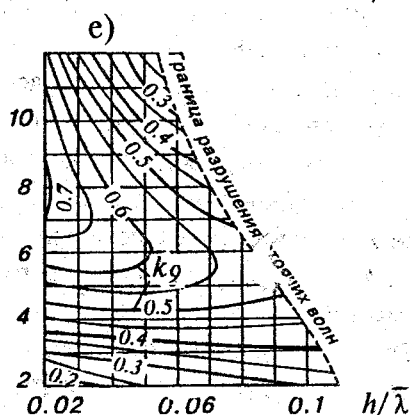
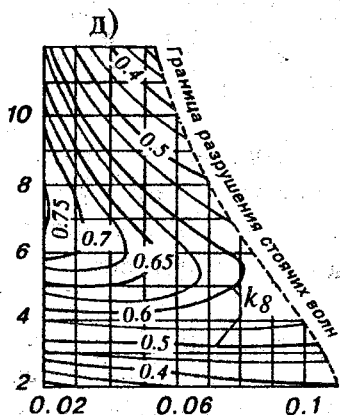
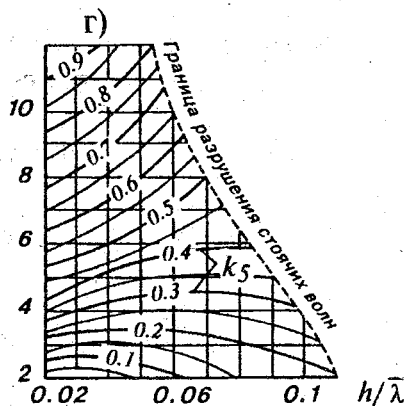
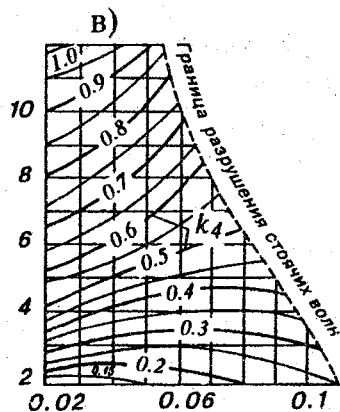
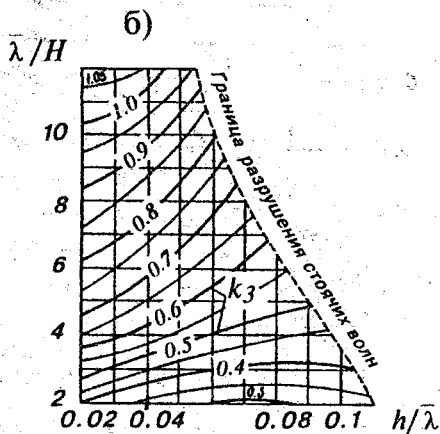
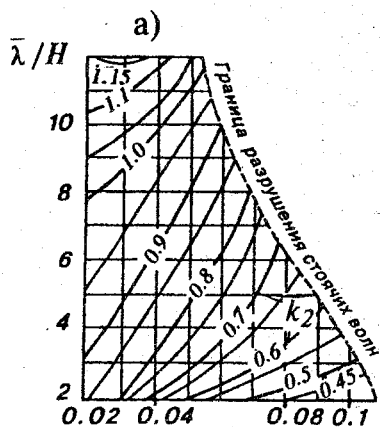


Рис. 3.4. Графики для определения коэффициентов k_2, k_3, k_4, k_5, k_8 и k_9 .

$$\begin{aligned}
 z_1 &= -h, & P_1 &= 0; \\
 z_2 &= 0, & P_2 &= 1.5\rho gh; \\
 z_3 &= H_c, & P_3 &= \frac{\rho gh}{\operatorname{ch}(k_H H_c)},
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

где h - высота поступательной волны, м.

Таблица 3.1. Расчет волнового давления

№ точки	z м	Волновое давление P кПа
При подходе гребня волны		
1	$-\eta_{\Gamma}$	$P_1 = 0$
2	0	$P_2 = k_2 \rho g \bar{h}$
3	$0.25H_p$	$P_3 = k_3 \rho g \bar{h}$
4	$0.5H_p$	$P_4 = k_4 \rho g \bar{h}$
5	H_p	$P_5 = k_5 \rho g \bar{h}$
При подходе ложбины волны		
6	0	$P_1 = 0$
7	η_{Π}	$P_2 = -\rho g \eta_{\Pi}$
8	$0.5H_p$	$P_3 = k_8 \rho g \bar{h}$
9	H_p	$P_4 = k_9 \rho g \bar{h}$

Расчет воздействия прибойных волн на сооружение вертикального профиля со стороны открытого моря проводится при глубине моря $H \leq H_{кр}$ ($H_{кр} < 0.7\bar{h}$) на примыкающем к сооружению участке дна протяженностью не менее $0.5\bar{\lambda}$. Возвышение вершины максимальной прибойной волны η_{Π} (м) над расчетным уровнем определяется по формуле

$$\eta_{\Pi} = -0.5H_c - h_{\Pi}, \tag{3.7}$$

знак "—" в которой соответствует началу координат на спокойном уровне и направлению оси z вниз.

Горизонтальная линейная волновая нагрузка F (кН/м) от воздействия прибойной волны определяется по площади эпюры волнового давления, рассчитанного для трех точек:

$$\begin{aligned} z_1 &= -h_n, & P_1 &= 0; \\ z_2 &= -(1/3) h_n, & P_2 &= 1.5 \rho g h_n; \\ z_3 &= H_c, & P_3 &= \frac{\rho g h_n}{\operatorname{ch}(2\pi/\lambda_n) H_c}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где λ_n — средняя длина прибойной волны, м; h_n — высота прибойной волны, м.

Вертикальная составляющая волнового давления вдоль подошвы сооружения (взвешивающее давление) принимается равной горизонтальному волновому давлению в крайних точках боковой грани сооружения при его линейном изменении в пределах ширины основания.

При совмещении с серединой секции сооружения вершины дифрагированной волны, т.е. со стороны огражденной акватории, горизонтальные составляющие волнового давления в расчетных точках в случае, если относительная длина секции сооружения $l_c/\bar{\lambda} \leq 0.8$, рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} z_1 &= \eta_{\max} = -\frac{h_d}{2} - \frac{k_H h_d^2}{8} \operatorname{cth}(k_H H_p), & P_1 &= 0; \\ z_2 &= 0, & P_2 &= k_l \rho g \left[\frac{h_d}{2} - \frac{k_H h_d^2}{8} \operatorname{cth}(k_H H_p) \right]; \\ z_3 &= H_c, & P_3 &= k_l \rho g \left[\frac{h_d}{2 \operatorname{ch}(k_H H_p)} - \frac{k_H h_d^2}{4 \operatorname{sh}(2k_H H_p)} \right], \end{aligned} \quad (3.9)$$

а при совмещении с серединой секции сооружения подошвы дифрагированной волны горизонтальные составляющие волнового давления определяются в расчетных точках по формулам

$$\begin{aligned} z_1 &= 0, & P_1 &= 0; \\ z_2 &= \eta_{\min} = \frac{h_d}{2} - \frac{k_H h_d^2}{8} \operatorname{cth}(k_H H_p), & P_2 &= -k_l \rho g \eta_{\min}; \\ z_3 &= H_c, & P_3 &= -k_l \rho g \left[\frac{h_d}{2 \operatorname{ch}(k_H H_p)} + \frac{k_H h_d^2}{4 \operatorname{sh}(2k_H H_p)} \right], \end{aligned} \quad (3.10)$$

где h_d – высота дифрагированной волны на акватории порта, м; k_l – коэффициент, определяемый в зависимости от относительной длины секции сооружения $l_c/\bar{\lambda}$ согласно табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значения коэффициента k_l

$l_c/\bar{\lambda}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
k_l	0.98	0.92	0.85	0.76	0.64	0.51	0.38	0.26

При расчетной глубине моря $H_p \geq 0.3$ со стороны огражденной акватории строится треугольная эпюра волнового давления, при принимается, что на глубине $z_3 = 0.3\bar{\lambda}$ горизонтальное давление равно нулю.

Для учета возможного размыва грунта непосредственно перед основанием сооружения и предотвращения этого явления рассчитывается максимальная донная скорость $V_{d,\max}$ (м/с) в области, удаленной на расстояние $0.25\bar{\lambda}$ от сооружения. При воздействии стоячих волн на сооружение $V_{d,\max}$ рассчитывается по формуле

$$V_{d,\max} = \frac{2k_{sl}\pi\bar{h}}{\sqrt{(\pi/g)\bar{\lambda} \cdot \text{sh}(2k_H H)}}; \quad (3.11)$$

при воздействии разбивающихся волн

$$V_{d,\max} = \sqrt{\frac{gh}{\text{ch}(2k_H H_c)}}; \quad (3.12)$$

при воздействии прибойной волны

$$V_{d,\max} = \sqrt{\frac{gh_{\pi}}{\text{ch}(2k_H H_c)}}, \quad (3.13)$$

где k_{sl} – коэффициент, зависящий от пологости волны $\bar{\lambda}/\bar{h}$ и определяемый по табл. 3.3.

Таблица 3.3. Значения коэффициента k_{sl}

Пологость волны $\bar{\lambda}/\bar{h}$	8	10	15	20	30
Коэффициент k_{sl}	0.6	0.7	0.75	0.8	1.0

Размыв грунта у основания может происходить при максимальных донных скоростях, которые превышают допустимые значе-

ния неразмывающих донных скоростей V_d для грунта с крупностью фракций D (мм), определяемой по графику (рис. 3.5). В случае, если $V_{d,\max} > V_d$, необходимо предусматривать защиту от размыва основания путем подсыпки грунта большей крупности.

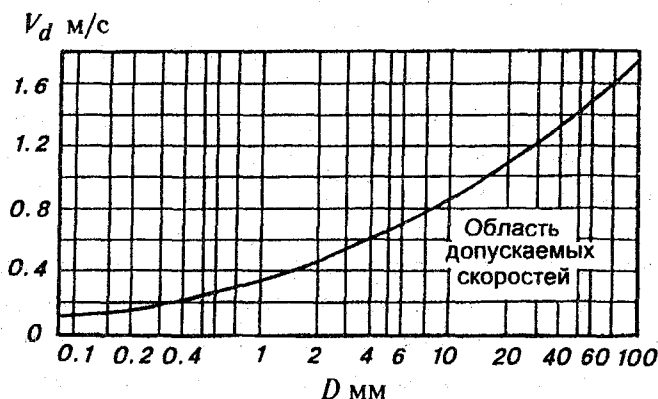


Рис. 3.5. График определения допускаемых значений неразмывающих донных скоростей.

Эпюры волнового давления используются при расчете сооружения на устойчивость от опрокидывания. Для этого по площади эпюр давления на боковые стенки сооружения и на его основание (взвешивающее давление) определяются результирующие силы, точки их приложения и составляются уравнения моментов сил относительно оси вращения (соответствующего нижнего ребра массива). При этом расчеты выполняются для наиболее неблагоприятных условий, когда противоположные стенки массива сооружения испытывают воздействия волн, находящихся в противофазе, что приводит к максимальным однонаправленным нагрузкам как волн, приходящих со стороны моря, так и дифрагированной волны со стороны огражденной акватории. Результирующий момент всех сил, действующих на сооружение, равен их алгебраической сумме. В этом случае моменты сил, действующих на опрокидывание (опрокидывающие моменты), и моменты противоположно направленных удерживающих сил, включающих в себя и вес секции сооружения, вводятся в уравнения моментов с разными знаками. При равновесии сил сумма их моментов равна нулю. Расчет сооружения на устойчивость выполняется при завышении опрокидывающих моментов в 1.6-1.8 раза по сравнению с расчетными. Из составленного таким образом урав-

нения моментов сил определяется минимальная ширина сооружения, достаточная для сохранения его устойчивости при воздействии волн рассчитанных параметров.

Исходные данные

1. Параметры волн у сооружения и на огражденной акватории $\bar{h}$, $\bar{\lambda}$, h_d (по результатам работы № 2).
2. Глубина моря около сооружения H , м.
3. Характеристики сооружения:
 - а) высота наброски под основанием сооружения, м ($\sim 0.5 \bar{h}$);
 - б) ширина бермы, м ($\sim 1.5 \bar{h}$);
 - в) толщина плиты бермы, м ($\sim 0.15 \bar{h}$);
 - г) длина секции сооружения ($l = 30$ м);
 - д) удельный вес бетона ($\gamma = 17.6 \text{ кН/м}^3$).
4. Коэффициент устойчивости сооружения ($M = 1.7$).

Порядок выполнения работы

1. Определить необходимые параметры сооружения и расчетную глубину H_p (м) около сооружения.

Расчетная глубина определяется по формуле (3.1). Коэффициент k_b в формуле (3.1) определяется с использованием графика (рис. 3.3) по отношению известных величин: глубины моря над наброской сооружения к глубине моря у сооружения (H_c/H) и ширины верхней площадки наброски перед сооружением (бермы) к длине средней волны, подходящей к сооружению ($B/\bar{\lambda}$).

2. Определить метод расчета давления волны на сооружение со стороны открытого моря.

Метод расчета волнового давления определяется в зависимости от высоты приходящей к сооружению волны, глубины моря и глубины над бермой сооружения.

3. Рассчитать возвышение и понижение уровня свободной волновой поверхности у вертикальной стенки, соответствующие максимальным значениям горизонтальных волновых нагрузок.

Возвышение и понижение свободной поверхности определяется по формулам в зависимости от типа волны, подходящей к сооружению (для стоячей волны используется формула (3.2), для прибойной волны – формула (3.8)).

Для определения возвышения уровня свободной поверхности при подходе к сооружению стоячей волны, соответствующего максимальным значениям горизонтальной линейной нагрузки, величина $\cos(\omega t)$ в формуле (3.2) рассчитывается с использованием выражения (3.3). При $H/\bar{\lambda} \leq 0.2$ и во всех других случаях, когда рассчитанные по формуле величины $\cos(\omega t) > 1$, в дальнейших расчетах следует принимать $\cos(\omega t) = 1$. При определении понижения уровня свободной поверхности, соответствующего максимальным значениям горизонтальной линейной нагрузки, в выражении (3.2) принимается $\cos(\omega t) = -1$.

4. Определить высоту проектируемого сооружения.

Высота сооружения над расчетным уровнем принимается выше отметки превышения волновой поверхности (для стоячей и прибойной волн) и выше отметки гребня волны (для разбивающейся волны) на 0.5 м.

5. Определить значения волнового давления в расчетных точках при гребне и подошве волны, подходящей к сооружению со стороны открытого моря, и построить эпюры ее давления на вертикальную стенку.

При строительстве сооружения в глубоководной зоне моря значения волнового давления на вертикальную стенку P (кПа) на глубине z (м) определяются по формуле (3.5). При выполнении расчетов для мелководной зоны значения волнового давления в расчетных точках определяются в зависимости от типа подходящей волны по следующим формулам: для стоячей волны (при подходе гребня и ложбины волны) — табл. 3.1, а при подходе к сооружению гребней разбивающейся волны — по формулам (3.6) и прибойной волны — по формулам (3.8).

При расчете давления от стоячих волн с использованием формул табл. 3.1 значения коэффициентов k_2, k_3, k_4, k_5, k_8 и k_9 определяются из графиков (см. рис. 3.4) по отношениям $\bar{\lambda}/H_p$ и $\bar{h}/\bar{\lambda}$.

6. Определить значения волнового давления P (кПа) от дифрагированных волн со стороны огражденной акватории при прохождении вдоль стенки сооружения гребня и подошвы волны.

Расчеты выполняются по формулам (3.9) и (3.10). Коэффициент k_1 в формулах принимается по табл. 3.2 с учетом относительной длины секции сооружения $l_c/\bar{\lambda}$. При глубине моря $H_p \geq 0.3$ со стороны огражденной акватории следует выполнять расчеты и строить эпюру давления по трем точкам, принимая на глубине $z_3 = 0.3\bar{\lambda}$ волновое давление равным нулю ($P_3 = 0$).

7. По эпюрам волнового давления определить горизонтальные волновые нагрузки F_x (кН) на элементы одной секции сооружения и точки их приложения.

Горизонтальные нагрузки определяются по площадям отдельных частей эпюры волнового давления.

8. По эпюрам взвешивающего волнового давления определить вертикальную составляющую волновой нагрузки F_z (кН) у основания вертикальной стенки на уровне верхней наброски.

Вертикальная составляющая волнового давления определяется по площади эпюры взвешивающего давления.

9. Определить максимальную донную скорость и соответствующую рассчитанной скорости крупность фракций грунта.

Максимальные донные скорости определяются в зависимости от типа волны, воздействующей на сооружение по формулам (3.11)-(3.13). По рассчитанному значению максимальной донной скорости с использованием графика (см. рис. 3.5) определяется допустимая крупность фракций грунта.

10. Составить уравнение моментов сил для оценки устойчивости сооружения на опрокидывание относительно точки, расположенной на линии пересечения верхней площадки наброски и вертикальной грани сооружения со стороны подошвы волны.

При выполнении расчетов для стоячей волны уравнение моментов сил составляется для наиболее неблагоприятных случаев (гребень—ложбина и ложбина—гребень). Для других типов волн — только для случая, когда со стороны открытого моря подходит гребень волны, а со стороны огражденной акватории — ложбина дифрагированной волны.

Составляющие моментов сил представляют собой произведение волновых нагрузок каждого элемента эпюры давления на эффективные плечи (рычаги) относительно соответствующих граней сооружения, проходящих через точку опрокидывания. В уравнении моментов сил опрокидывающие составляющие, действующих на сооружение сил, умножаются на коэффициент устойчивости ($M = 1.7$). Расчет удерживающей силы, со-ответствующей весу секции сооружения, выполняется отдельно для ее частей, находящихся над расчетным уровнем и ниже его под водой. При определении веса части секции сооружения, находящейся под водой, удельный вес бетона уменьшается на удельный вес морской воды.

11. Определить минимальную ширину секции сооружения, достаточную для сохранения ее устойчивости при воздействии волн рассчитанных параметров.

Ширина секции сооружения определяется из решения уравнения моментов сил.

12. Выполнить анализ результатов.

При выполнении анализа полученных результатов расчетов провести сравнение максимальных волновых нагрузок, возникающих при подходе к стенке сооружения гребня и ложбины волн со стороны открытого моря и ложбины и гребня дифрагированной волны со стороны огражденной акватории соответственно.

Сравнить рассчитанные значения ширины проектируемого сооружения при максимальных опрокидывающих моментах в сторону огражденной акватории порта и в сторону открытого моря и выбрать оптимальную ширину секции сооружения.

Пример выполнения работы

Глубина у сооружения $H = 14.00$ м.

Средняя высота волны $\bar{h} = 6.58$ м.

Средняя длина волны $\bar{\lambda} = 104.00$ м.

Высота дифрагированной волны $h_d = 2.00$ м ≈ 4 м

Параметры сооружения

Толщина подошвы сооружения — 3.29 м

Глубина моря над основанием — 10.71 м

Ширина бермы сооружения — 9.87 м

Толщина бермы сооружения — 0.99 м

Глубина моря над бермой — 9.72 м

$$k_H = 0.060; \quad H_c/H = 0.765; \quad B/\bar{\lambda} = 0.095;$$

Коэффициент $k_B = 0.662$.

Расчетная глубина моря $H_p = 12.89$ м

Расчет для стоячих волн

$$\cos(\omega t) = 1.0$$

$$\eta_T = -8.48 \text{ м}, \quad \eta_L = 4.68 \text{ м}$$

Высота сооружения $H_s = 22.98$ м

Расчет со стороны открытого моря

$$\bar{h}/\bar{\lambda} = 0.063; \quad \bar{\lambda}/H_p = 8.069;$$

$$k_2 = 0.84, \quad k_3 = 0.71, \quad k_4 = 0.61, \quad k_5 = 0.54, \quad k_8 = 0.52, \quad k_9 = 0.46.$$

Волновое давление при гребне волны

$$\begin{aligned} z_1 &= -8.48 \text{ м} & P_1 &= 0 \text{ кПа} \\ z_2 &= 0 \text{ м} & P_2 &= 55.632 \text{ кПа} \\ z_3 &= 3.22 \text{ м} & P_3 &= 47.022 \text{ кПа} \\ z_4 &= 6.44 \text{ м} & P_4 &= 40.399 \text{ кПа} \\ z_5 &= 12.89 \text{ м} & P_5 &= 35.763 \text{ кПа} \\ & & P'_1 &= 37.331 \text{ кПа} \end{aligned}$$

Волновое давление при ложбине волны

$$\begin{aligned} z_1 &= 0 \text{ м} & P_1 &= 0 \text{ кПа} \\ z_2 &= 4.68 \text{ м} & P_2 &= -47.119 \text{ кПа} \\ z_3 &= 6.44 \text{ м} & P_3 &= -34.439 \text{ кПа} \\ z_4 &= 12.89 \text{ м} & P_4 &= -30.465 \text{ кПа} \\ & & P'_4 &= -31.808 \text{ кПа} \end{aligned}$$

Расчет со стороны огражденной акватории

$$l_c/\bar{\lambda} = 0.288, \quad k_l = 0.858.$$

Волновое давление при гребне волны

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= -1.05 \text{ м}, \\ z_6 &= -1.05 \text{ м} & P_6 &= 0 \text{ кПа} \\ z_7 &= 0 \text{ м} & P_7 &= 8.236 \text{ кПа} \\ z_8 &= 10.71 \text{ м} & P_8 &= 6.319 \text{ кПа} \\ & & P'_8 &= 6.319 \text{ кПа} \end{aligned}$$

Волновое давление при ложбине волны

$$\begin{aligned} \eta_{\min} &= 0.95 \text{ м}, \\ z_6 &= 0 \text{ м} & P_6 &= 0 \text{ кПа} \\ z_7 &= 0.95 \text{ м} & P_7 &= -8.236 \text{ кПа} \\ z_8 &= 10.71 \text{ м} & P_8 &= -6.779 \text{ кПа} \\ & & P'_8 &= -6.779 \text{ кПа} \end{aligned}$$

Расчет волновых нагрузок (рис. 3.6)

Гребень – ложбина

Ложбина – гребень

Горизонтальные нагрузки

$$\begin{aligned} F_1 &= 235.84 \text{ кН} \\ F_2 &= 151.51 + 13.87 = 165.38 \text{ кН} \\ F_3 &= 130.17 + 10.67 = 140.84 \text{ кН} \\ F_4 &= 159.24 + 6.54 = 165.78 \text{ кН} \\ F_5 &= -3.93 \text{ кН} \\ F_6 &= -66.14 + (-7.11) = -73.25 \text{ кН} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_1 &= -110.29 \text{ кН} \\ F_2 &= -60.71 + (-11.18) = -71.89 \text{ кН} \\ F_3 &= -135.68 + (-5.61) = -141.29 \text{ кН} \\ F_5 &= 4.31 \text{ кН} \\ F_6 &= 67.67 + 10.27 = 77.94 \text{ кН} \end{aligned}$$

Вертикальные нагрузки

$$\begin{aligned} F_7 &= 18.67 \cdot x \text{ кН} \\ F_8 &= -3.39 \cdot x \text{ кН} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_7 &= -15.90 \cdot x \text{ кН} \\ F_8 &= 3.16 \cdot x \text{ кН} \end{aligned}$$

Вес сооружения над уровнем

$$G_a = 158.023 \cdot x \text{ кН}$$

Вес сооружения ниже уровня

$$G_w = 80.699 \cdot x \text{ кН}$$

Максимальная донная скорость

$$V_{d, \max} = 3.35 \text{ м/с}$$

Грунт перед сооружением необходимо укреплять.

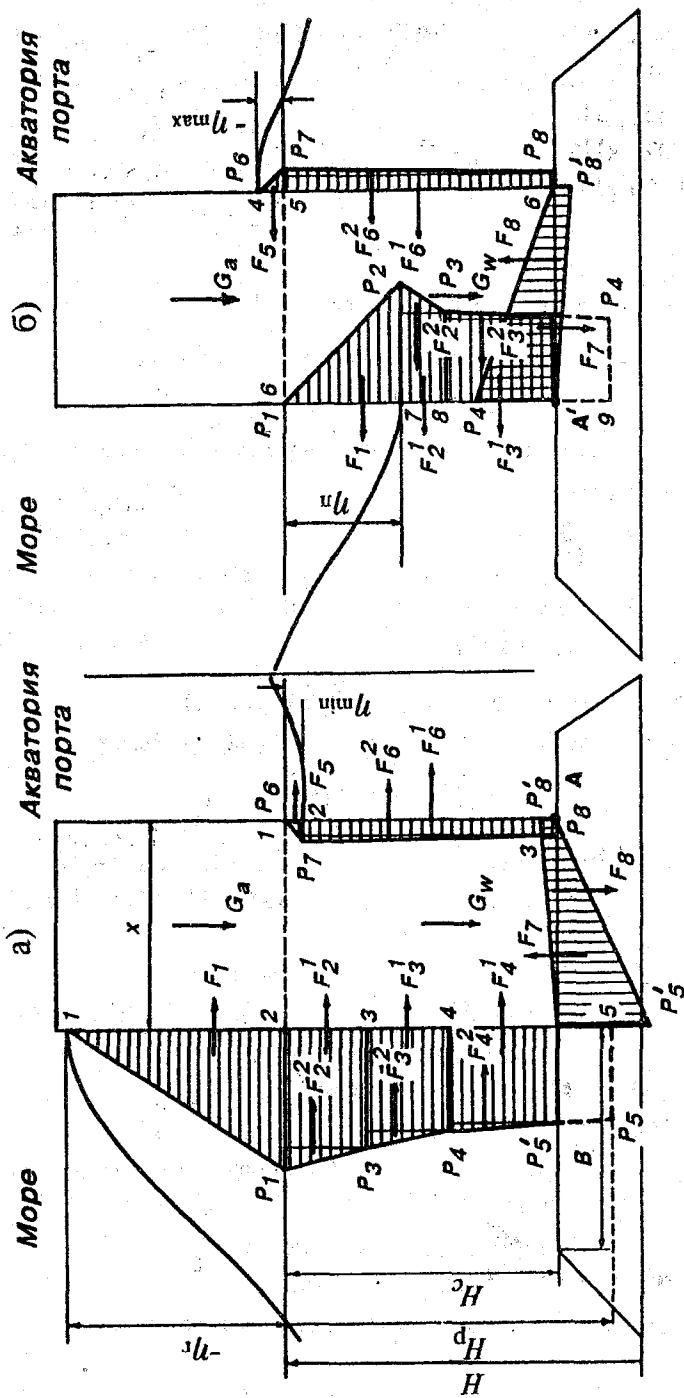


Рис. 3.6. Эпюры давления на вертикальную стенку от стоячих волн со стороны открытого моря и дифрагированных волн со стороны огражденной акватории:
 а) гребень — ложбина; б) ложбина — гребень.

Уравнение моментов сил

Гребень — ложбина

$$(F_1 L_1 + F_2^1 L_2 + F_2^2 L_3 + F_3^1 L_4 + F_3^2 L_5 + F_4^1 L_6 + F_4^2 L_7 + F_5 L_8 + \\ + F_6^1 L_9 + F_6^2 L_{10} + F_7 L_{11} x) M - F_8 L_{12} x - G_a L_{13} x - G_w L_{14} x = 0$$

$$8451.85 = 99.34 x^2$$

Ширина сооружения: $x = 9.22$ м

Ложбина — гребень

$$(F_1 L_1 + F_2^1 L_2 + F_2^2 L_3 + F_3^1 L_4 + F_3^2 L_5 + F_5 L_6 + F_6^1 L_7 + F_6^2 L_8 + \\ + F_8 L_9 x) M - F_7 L_{10} x - G_a L_{11} x - G_w L_{12} x = 0$$

$$3393.24 = 121.08 x^2$$

Ширина сооружения: $x = 5.29$ м

Литература

1. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. - Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. - 432 с.

2. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. - М.: Госстрой СССР, 1989. - 40 с.

Работа № 4

Расчет воздействия волн на вертикальную обтекаемую преграду

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой расчета максимальной силы и линейных нагрузок от воздействия волн на расположенную в море вертикальную обтекаемую преграду.
2. Рассчитать значения максимальной силы, линейных нагрузок и давления от воздействия гребня волны на расположенную в море вертикальную колонну.

В практике строительства гидротехнических сооружений широко используются обтекаемые преграды в виде отдельно стоящих свай (колонн) или элементов сквозных сооружений. Вертикальные обтекаемые преграды, являющиеся составными частями прибрежных сооружений, эстакад и платформ для разведки и добычи в море полезных ископаемых, испытывают воздействия волн, длины которых значительно превышают поперечные размеры преград. Волны при обтекании подобных сооружений и их составных элементов в этом случае не испытывают деформации и поэтому принимаются при расчете бегущими.

Согласно [2], научные положения исследований воздействия волн на обтекаемые преграды сводятся к следующему:

- нагрузки от волн в общем случае должны определяться как сумма скоростного и инерционного компонентов;
- в некоторых случаях достоверные результаты по определению максимальных сил могут быть получены либо только по скоростному (для малых преград), либо по инерционному (для больших преград) компоненту;
- динамический эффект от воздействия нерегулярных волн следует учитывать только в тех случаях, когда период собственных колебаний сооружения соизмерим со средним периодом набегающих

волн.

Жидкость при этом рассматривается как идеальная, с постоянной плотностью ρ ; движение безвихревое, неустановившееся.

Сила F (кН), с которой волны действуют на обтекаемую преграду в виде кругового цилиндра, представляется как сумма сил скоростной F_v и инерционной F_i составляющих [1,2]:

$$F = F_v + F_i = C_v \rho D \frac{u|u|}{2} + C_i \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{du}{dt}, \quad (4.1)$$

где C_v , C_i – соответственно скоростной и инерционный коэффициенты, которые определяются на основе натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов; u – горизонтальная составляющая скорости течения, м/с; D – диаметр обтекаемой преграды, м; ρ – плотность воды, кг/м³; t – время, с.

Кинематические характеристики волн определяются из выражений

$$u = A \omega \frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \cos(\omega t), \quad (4.2)$$

$$\frac{du}{dt} = -A \omega^2 \frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \sin(\omega t), \quad (4.3)$$

где A – амплитуда колебаний уровня, м; H – глубина моря, м; k_H – волновое число, равное $2\pi/\lambda_H$; ω – угловая частота колебаний, определяемая как $2\pi/\tau$; τ – период колебаний волны, с; z – расстояние от основания сооружения до расчетного горизонта, м.

После подстановки уравнений (4.2) и (4.3) в (4.1) для элемента dz (рис. 4.1) круглого цилиндра выражения для нагрузок будут иметь следующий вид:

$$F_v = C_v \rho D \frac{A^2 \omega^2}{32} \left[\frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \cos(\omega t) \right]^2, \quad (4.4)$$

$$F_i = -C_i \rho \frac{\pi D^2}{4} A \omega^2 \frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \sin(\omega t), \quad (4.5)$$

Полная сила, действующая на сваю, определяется путем интегрирования выражений (4.4) и (4.5) по длине погруженной в воду части сооружения.

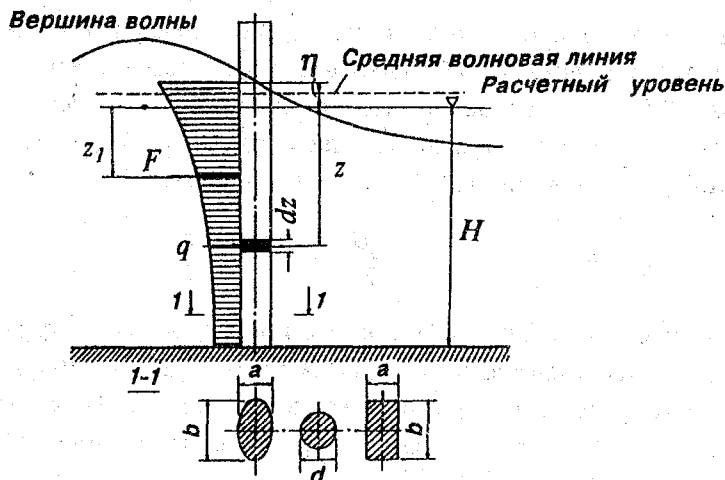


Рис. 4.1. Схема сваи (колонны) для определения волновых нагрузок на обтекаемые преграды.

Для определения волновых нагрузок на обтекаемые преграды применяются метод лабораторного моделирования и расчетные методы с использованием номограмм и графиков, рекомендованных для практического применения и представленных в СНиПе [3].

В расчетном методе максимальная сила от воздействия волн $F_{\max}$ (кН) на расположенную в море вертикальную обтекаемую преграду с поперечными размерами $a < 0.4 \bar{\lambda}_H$ и $b < 0.4 \bar{\lambda}_H$ (см. рис. 4.1) рассчитывается по формуле [2,3]:

$$F_{\max} = F_{i \max} \delta_i + F_{v \max} \delta_v, \quad (4.6)$$

где $F_{i \max}$ и $F_{v \max}$ — соответственно инерционный и скоростной компоненты силы, определяемые из соотношений

$$F_{i \max} = \frac{1}{4} \rho g \pi b^2 h k_v \alpha_i \beta_i, \quad (4.7)$$

$$F_{v \max} = \frac{1}{12} \rho g \pi b h^2 k_v^2 \alpha_v \beta_v, \quad (4.8)$$

δ_i и δ_v — коэффициенты сочетания соответственно инерционной и скоростной компонентов максимальной силы от воздействия волн, принимаемые по графикам, приведенным в [3]; k_v — коэффициент,

определяемый по табл. 4.1, с учетом относительного размера преграды $D/\bar{\lambda}_H$; α_i , α_v – соответственно инерционный и скоростной компоненты глубины, которые определяются по графикам в зависимости от $H/\bar{\lambda}_H$ и $\bar{\lambda}_H/h$ (рис. 4.2); β_i , β_v – соответственно инерционный и скоростной компоненты формы преграды, принимаемые по графикам (рис. 4.3); g – ускорение свободного падения, равное 9.81 м/с^2 ; ρ – плотность морской воды, равная 1026 кг/м^3 .

Таблица 4.1. Значения коэффициента k_v

Относительный размер преграды $a/\bar{\lambda}_H, b/\bar{\lambda}_H, D/\bar{\lambda}_H$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40
Коэффициент k_v	1.00	0.97	0.93	0.86	0.79	0.70	0.52

В основе уравнения (4.6) лежит выражение (4.1). При определении компонентов силы в момент подхода вершины волны к преграде (в данном случае к малой преграде) можно принять $\delta_i = 0$ и $\delta_v = 1$.

Линейная нагрузка от волн q (кН/м), т.е. сила, действующая на поверхность элемента сваи высотой 1 м, на глубине z (м) при максимальной силе от воздействия волн $F_{\max}$ в момент подхода вершины волны к сооружению определяется по формуле [2,3]:

$$q_{v,\max} = \frac{2}{3} \rho g \pi b \frac{h^2}{\lambda_H} k_v^2 \theta_{xv} \beta_v, \quad (4.9)$$

где θ_{xv} – коэффициент линейной нагрузки от волн, определяемый с использованием графиков (рис. 4.4) по по относительной глубине:

$$z_{\text{отн}} = (H - z)/H. \quad (4.10)$$

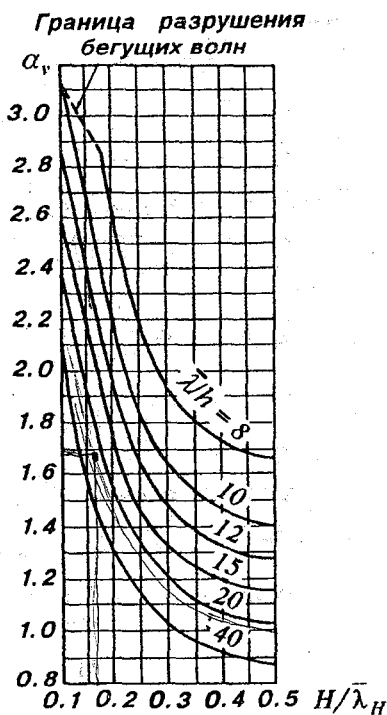


Рис. 4.2. Графики значений скоростного коэффициента глубины α_v

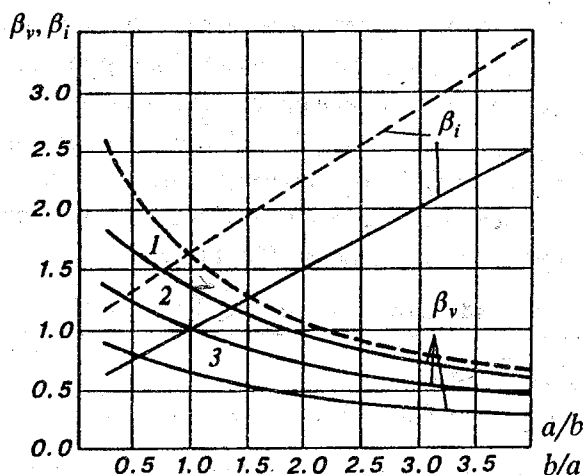


Рис. 4.3. Графики значений инерционного β_i и скоростного β_v коэффициентов формы (для эллиптических преград - сплошные линии, для призматических - штриховые): 1 - для шероховатой и эллиптической преграды; 2 - гладкой; 3 - шероховатой в подводной и гладкой в надводной частях вертикальной эллиптической преграды.

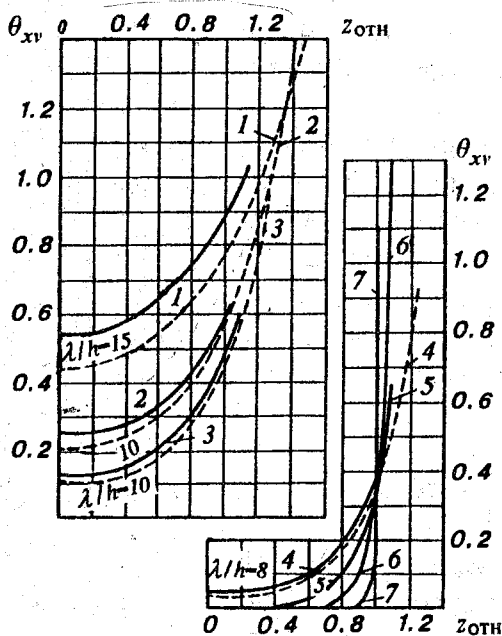


Рис. 4.4. Графики коэффициентов линейной нагрузки от волн θ_{xv} при $H/\bar{\lambda}_H$ ($\bar{\lambda}_H/h=40$ - сплошные линии; $\bar{\lambda}_H/h=8-15$ - штриховые линии): 1 - 0.1; 2 - 0.15; 3 - 0.2; 4 - 0.3; 5 - 0.5; 6 - 1.0; 7 - 5.0;

Исходные данные

1. Глубина моря H (м).
2. Диаметр сваи (колонны) D (м).
3. Характеристики волнения (по результатам работы № 2): средняя высота волны $\bar{h}$ (м), средняя длина волны $\bar{\lambda}_H$ (м).

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать максимальную силу $F_{\max}$ (кН) от воздействия волн на сваю (колонну) при подходе к сооружению вершины волны.

Расчет максимальной силы от воздействия волн выполняется по формулам (4.6)–(4.8). Значение коэффициента k_v определяется из табл. 4.1 по относительному размеру сваи D/λ_H . Значения скоростных коэффициентов α_v и β_v определяются по графикам (см. рис. 4.2, 4.3) по относительным величинам $H/\bar{\lambda}_H$, $\bar{\lambda}_H/h$ и диаметру сваи D .

2. Рассчитать линейную нагрузку от воздействия волн $q_{v,\max}$ (кН/м) на сваю для площадки единичной высоты на расчетных горизонтах.

Определение линейной нагрузки от волн на сваю производится по формуле (4.9). Коэффициенты k_v и β_v те же, что и при расчете максимальной силы (п. 1). Коэффициент линейной нагрузки волн θ_{xy} принимается по графику (см. рис. 4.4) по значениям отношения $\bar{\lambda}_H/h$ и относительной глубине $z_{отн}$ (выражение 4.10). Для расчетов принимать 4-5 горизонтов в зависимости от глубины места.

3. Рассчитать давление воды P (кН/м²) на сваю для принятых горизонтов.

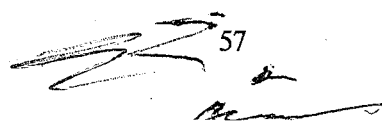
Для определения давления воды на сваю необходимо значение линейной нагрузки, определенной для площадки единичной высоты, разделить на длину этой площадки, т.е. на половину длины окружности сваи.

4. Построить эпюры давления волн на сваю (колонну).

При построении эпюры давления на сваю значения давления экстраполируются от первого расчетного горизонта до поверхности и от последнего – до дна.

5. Анализ результатов.

Выполнить анализ результатов расчетов и сравнить волновые нагрузки на обтекаемые сооружения типа сваи (колонны) и на сплошные сооружения типа вертикальной стенки, для чего использовать результаты работы № 3.

57


Пример выполнения работы

Глубина моря у сооружения $H = 14.00$ м

Средняя высота волны $\bar{h} = 6.58$ м

Средняя длина волны $\lambda_H = 104.00$ м

Диаметр сваи $D = 4.00$ м

$$D/\lambda_H = 0.038,$$

$$k_v = 1.000,$$

$$\text{Коэффициент } \alpha_v = 2.277,$$

$$H/\lambda_H = 0.135,$$

$$\lambda_H/\bar{h} = 15.805,$$

$$\text{Коэффициент } \beta_v = 0.660,$$

$$F_v, \max = 218.270 \text{ кН}$$

Число расчетных горизонтов: 5 (рис. 4.5)

$$z_1 = 2.5 \text{ м}$$

$$z_{OTH} = 0.821$$

$$\theta_{xv} = 0.660$$

$$z_2 = 5.0 \text{ м}$$

$$z_{OTH} = 0.643$$

$$\theta_{xv} = 0.590$$

$$z_3 = 7.5 \text{ м}$$

$$z_{OTH} = 0.464$$

$$\theta_{xv} = 0.500$$

$$z_4 = 10.0 \text{ м}$$

$$z_{OTH} = 0.286$$

$$\theta_{xv} = 0.470$$

$$z_5 = 12.5 \text{ м}$$

$$z_{OTH} = 0.107$$

$$\theta_{xv} = 0.430$$

Линейная нагрузка

$$q_1 = 15.29 \text{ кН/м}$$

$$q_2 = 13.67 \text{ кН/м}$$

$$q_3 = 11.58 \text{ кН/м}$$

$$q_4 = 10.89 \text{ кН/м}$$

$$q_5 = 9.96 \text{ кН/м}$$

Волновое давление

$$P_1 = 2.43 \text{ кН/м}^2$$

$$P_2 = 2.18 \text{ кН/м}^2$$

$$P_3 = 1.84 \text{ кН/м}^2$$

$$P_4 = 1.73 \text{ кН/м}^2$$

$$P_5 = 1.59 \text{ кН/м}^2$$

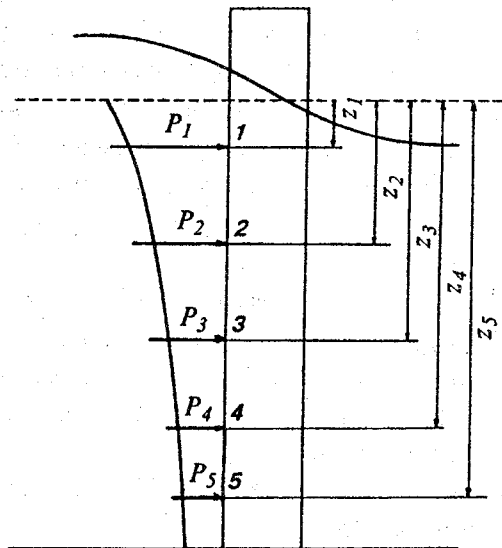


Рис. 4.5. Расчет волнового давления на сваю.

Литература

1. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. - Л.: Судостроение, 1986. - 286 с.
2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. - Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. - 432 с.
3. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. - М.: Госстрой СССР, 1989. - 40 с.

Работа № 5

Расчет волновых нагрузок на гидротехнические сооружения ферменного типа

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой расчета волновых нагрузок на типовые гидротехнические сооружения, используемые на морских нефтепромыслах.
2. Рассчитать горизонтальные нагрузки на сооружение статическим методом, предварительно оценив динамический эффект волновых воздействий.

Перед расчетом проектируемого сооружения необходимо получить количественные оценки для всех основных нагрузок, которым оно может быть подвергнуто со стороны окружающей среды в океане. В инженерных расчетах воздействия окружающей среды характеризуются в основном ветром в приводном слое атмосферы, поверхностными волнами и течениями, возникающими в условиях жесткого шторма. Наиболее значительными являются нагрузки от волн на подводную часть сооружения.

При проектировании и строительстве опорных конструкций стационарных буровых установок, предназначенных для разведки и добычи нефти и газа на морском шельфе, выполняется расчет волновых нагрузок в целом на сооружение и на его отдельные элементы. Наиболее распространенным видом морских гидротехнических сооружений открытого моря является буровая платформа на опорном основании ферменного типа (рис. 5.1).

Волновые нагрузки на подобные сооружения определяются путем суммирования силовых воздействий на все отдельные элементы конструкции при различном положении профиля расчетной волны относительно оси сооружения. Определение волновых нагрузок при этом проводится в два этапа. Сначала с помощью соответствующей

Литература

1. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. - Л.: Судостроение, 1986. - 286 с.
2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. - Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. - 432 с.
3. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. - М.: Госстрой СССР, 1989. - 40 с.

Работа № 5

Расчет волновых нагрузок на гидротехнические сооружения ферменного типа

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой расчета волновых нагрузок на типовые гидротехнические сооружения, используемые на морских нефтепромыслах.
2. Рассчитать горизонтальные нагрузки на сооружение статическим методом, предварительно оценив динамический эффект волновых воздействий.

Перед расчетом проектируемого сооружения необходимо получить количественные оценки для всех основных нагрузок, которым оно может быть подвергнуто со стороны окружающей среды в океане. В инженерных расчетах воздействия окружающей среды характеризуются в основном ветром в приводном слое атмосферы, поверхностными волнами и течениями, возникающими в условиях жесткого шторма. Наиболее значительными являются нагрузки от волн на подводную часть сооружения.

При проектировании и строительстве опорных конструкций стационарных буровых установок, предназначенных для разведки и добычи нефти и газа на морском шельфе, выполняется расчет волновых нагрузок в целом на сооружение и на его отдельные элементы. Наиболее распространенным видом морских гидротехнических сооружений открытого моря является буровая платформа на опорном основании ферменного типа (рис. 5.1).

Волновые нагрузки на подобные сооружения определяются путем суммирования силовых воздействий на все отдельные элементы конструкции при различном положении профиля расчетной волны относительно оси сооружения. Определение волновых нагрузок при этом проводится в два этапа. Сначала с помощью соответствующей

шей волновой теории определяют изменение поверхности воды и кинематику потока жидкости, начиная с изменения волновой поверхности по высоте. Затем определяют гидродинамические силы [1-3].

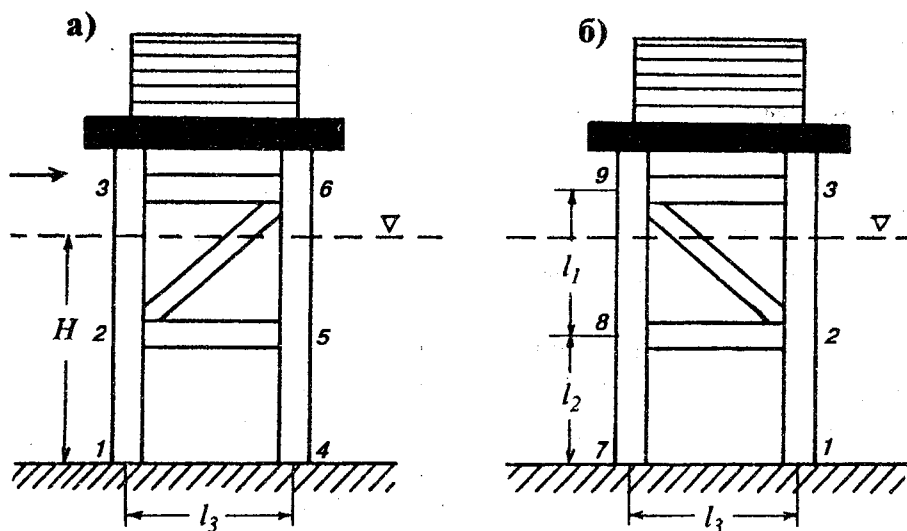


Рис. 5.1. Боковая (а) и фронтальная (б) по отношению к волновому воздействию стороны основания буровой платформы.

Под влиянием волнения сооружение совершает колебания той же частоты, что и частота волновой нагрузки. Возникающие при этом ускорения создают в сооружении инерционные силы, эффект которых проявляется в виде увеличения перемещений, связанных с волновым воздействием. Перемещения платформы, а значит и напряжения в опорном основании, возрастают, если частота волнового воздействия близка к собственной частоте сооружения, т.е. в этом случае наблюдается динамический эффект. При малых динамических нагрузках применяется статический расчет сооружений подобного типа, а при значительных – динамический метод расчета сооружений [1,4].

Для оценки влияния динамического эффекта волновых воздействий опорное основание схематично представляется в виде стержня с одной степенью свободы, имеющего приведенную массу на уровне верхней части сооружения. Приведенная масса склады-

вается из массы платформы и половины массы опорного основания, включая присоединенную массу. Под присоединенной массой воды понимается фиктивная масса, которая связана с движением сооружения и определяется как сумма присоединенных масс, соответствующих отдельным элементам, каждая из которых рассчитывается по формуле [1]:

$$m' = \rho(C_{\text{ин}} - 1) \frac{\pi D^2}{4}, \quad (5.1)$$

где D – диаметр элемента сооружения, м; $C_{\text{ин}}$ – коэффициент инерционного сопротивления; ρ – плотность морской воды, равная 1026 кг/м³.

Динамический эффект волнового воздействия на сооружение оценивается с помощью коэффициента динамичности K_d , который представляет собой отношение амплитуды колебаний сооружения X_0 к максимальному перемещению верхней части конструкции при статическом приложении нагрузки X_{st} [1]:

$$K_d = \frac{X_0}{X_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + (2\beta\omega / \omega_0^2)^2}}, \quad (5.2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ – собственная частота колебаний сооружения; K – жесткость сооружения; m – приведенная масса сооружения; $\omega = 2\pi/\tau$ – частота волны; τ – период волны; β/ω_0 – коэффициент затухания колебаний системы ($\beta = 0.5[C/m]$); C – коэффициент сопротивления из уравнения, описывающего колебательный процесс с амплитудой приведенной волновой нагрузки F_0 :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t), \quad (5.3)$$

Статический расчет сооружений допустим только в том случае, если значение коэффициента динамичности K_d отличается от единицы не более чем на 5–10 %.

При расчете нагрузок на гидротехнические сооружения ферменного типа статическим методом горизонтальная волновая нагрузка на единицу длины элемента сооружения может быть рассчитана по формуле Морисона, которая описывает скоростную и инерционную силы независимо от формы волны [1, 2, 4]:

$$f = 0.5 \rho C_{\text{ск}} D |v_x| v_x + \rho C_{\text{ин}} \frac{\pi D^2}{4} a_x, \quad (5.4)$$

где v_x , a_x — соответственно горизонтальные составляющие скорости и ускорения жидкости; $C_{\text{ск}}$, $C_{\text{ин}}$ — соответственно коэффициенты скоростного и инерционного сопротивлений.

Расчеты с использованием формулы (5.4) допускается выполнять при малом диаметре элементов сооружения по сравнению с длиной волны, т.е. при отношении $D/\lambda = 0.2$ и меньше, когда можно пренебречь искажением формы волны при ее взаимодействии с сооружением.

Для предварительных оценок, установления основных характеристик, определяющих движение воды на поверхности, и статистического описания волн и связанного с ними движения воды в штормовых условиях наиболее часто используется теория волн малой амплитуды (теория волн Эри), хотя строго говоря, эта теория неприемлема к волнам, характерным для условий, при которых должно рассчитываться морское сооружение.

При рассмотрении волн малой амплитуды, высотой h , частотой ω и с волновым числом k_H , которые распространяются по акватории с глубиной H , использование расчетных зависимостей теории волн Эри (при совмещении оси z с осью передней колонны) дает:

$$F = F_{\text{ск}} + F_{\text{ин}}, \quad (5.5)$$

где $F_{\text{ск}}$, $F_{\text{ин}}$ — нагрузки, связанные соответственно со скоростным и инерционным сопротивлениями и определяемые для колонн постоянного диаметра по формулам [1]

$$F_{\text{ск}} = \frac{\rho C_{\text{ск}} D}{32 k_H} (\omega h)^2 \left[\frac{\text{sh}(2k_H h^*) + 2k_H h^*}{\text{sh}^2(k_H H)} \right] |\cos(\omega t)| \cos(\omega t), \quad (5.6)$$

$$F_{\text{ин}} = -\rho \frac{C_{\text{ин}}}{2 k_H} \frac{\pi D^2}{4} (\omega^2 h) \left[\frac{\text{sh}(k_H h^*)}{\text{sh}(k_H H)} \right] \sin(\omega t), \quad (5.7)$$

где $h^* = H + \eta$; η — отклонение волновой поверхности у колонны от уровня спокойной воды.

Составляющие скорости и ускорения жидкости определяются в соответствии с выбранной теорией волн. Используя теорию волн ма-

лой амплитуды (для установления основных волновых характеристик при предварительных оценках), отклонение волновой поверхности от уровня спокойного моря, составляющие скорости и ускорения определяются по формулам следующего вида [1]:

$$\eta = \frac{h}{2} \cos(\omega t), \quad (5.8)$$

$$v_x = \frac{\omega h}{2} \cdot \frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \cos(k_H x - \omega t),$$

$$v_z = \frac{\omega h}{2} \cdot \frac{\operatorname{sh}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \sin(k_H x - \omega t),$$

$$a_x = \frac{\omega^2 h}{2} \cdot \frac{\operatorname{ch}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \sin(k_H x - \omega t),$$

$$a_z = -\frac{\omega^2 h}{2} \cdot \frac{\operatorname{sh}(k_H z)}{\operatorname{sh}(k_H H)} \cos(k_H x - \omega t), \quad (5.9)$$

где $k_H = 2\pi/\lambda$ – волновое число; x – расстояние до точки приложения силы. Начало координат выбрано в точке пересечения вертикальной оси передней колонны сооружения и поверхности дна (рис. 5.1).

Равнодействующие нагрузки F на вертикальные элементы сооружения (колонну) от дна до уровня z и моменты сил M , если скорости и ускорения жидкости заметно изменяются по длине рассматриваемых элементов, определяются путем их интегрирования

$$F_x = \int_0^z f_x(z) dz, \quad M_x = \int_0^z z f_x(z) dz, \quad (5.10)$$

а плечо равнодействующей силы относительно основания определяется как

$$l = M / F. \quad (5.11)$$

Для сравнительно коротких элементов, таких, как поперечные связи сооружения, где характеристики движения воды изменяются незначительно от одного конца элемента к другому, возможно использование осредненных значений составляющих скорости и ускорения. В этом случае равнодействующие волновой нагрузки на элемент сооружения определяются как

$$F_x = f_x l, \quad F_y = f_y l, \quad F_z = f_z l. \quad (5.12)$$

При глубинах около сооружения, превышающих длину волны, и относительно большом диаметре сваи по сравнению с высотой волны скоростная составляющая волновой нагрузки для приближенных расчетов может не учитываться. В случае, если диаметр сваи соизмерим с длиной волны, коэффициент инерционного сопротивления $C_{ин}$ определяется по табл. 5.1.

Таблица 5.1. Значения коэффициента $C_{ин}$

D/λ	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
$C_{ин}$	2.20	2.10	1.90	1.50	1.20	0.80	0.60

Нагрузки от волн на произвольно ориентированный цилиндрический элемент сквозного сооружения определяются в предположении, что [2]:

- волновое давление, нормальное к оси элемента, рассчитывается с учетом значений составляющих скорости и ускорения, нормальных к той же оси;

- ось x совпадает с направлением луча волны и боковой гранью сооружения;

- движение жидкости характеризуется проекциями скорости v_x и v_z и локальных ускорений a_x и a_z .

Таким образом, волновая нагрузка на наклонные элементы представляется в виде горизонтальных и вертикальных проекций нормальной ее составляющей к оси цилиндра. Нормальная к оси элемента скорость жидкости в полярной системе координат определяется по формуле [1,2]

$$v_n = \sqrt{v_x^2 + v_z^2 - (\delta_x v_x + \delta_z v_z)^2}, \quad (5.13)$$

а ее проекции на оси координат находятся из выражений

$$\begin{aligned} v_{nx} &= v_x - \delta_x (\delta_x v_x + \delta_z v_z), \\ v_{ny} &= -\delta_y (\delta_x v_x + \delta_z v_z), \\ v_{nz} &= v_z - \delta_z (\delta_x v_x + \delta_z v_z). \end{aligned} \quad (5.14)$$

Выражения для составляющих ускорения жидкости, нормального к оси цилиндра, имеют следующий вид:

$$a_{nx} = a_x - \delta_x (\delta_x a_x + \delta_z a_z),$$

$$a_{ny} = -\delta_y(\delta_x a_x + \delta_z a_z),$$

$$a_{nz} = a_z - \delta_z(\delta_x a_x + \delta_z a_z),$$

где (рис. 5.2)

$$\delta_x = \sin(\varphi)\cos(\theta),$$

$$\delta_y = \sin(\varphi)\sin(\theta),$$

$$\delta_z = \cos(\varphi).$$

В результате для составляющих погонной волновой нагрузки на цилиндрическую преграду, произвольно ориентированную в пространстве, в общем случае можно записать:

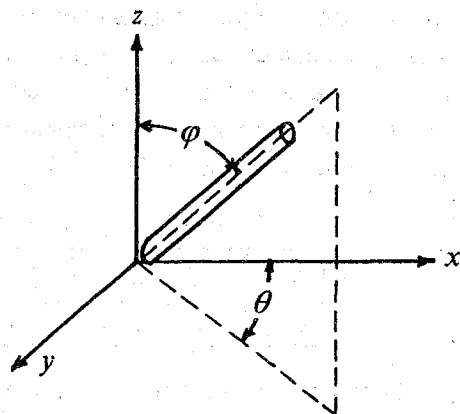


Рис. 5.2. Цилиндрический элемент, ориентированный в пространстве.

$$f_x = 0.5\rho C_{\text{ск}} D v_n v_{nx} - \rho C_{\text{ин}} \frac{\pi D^2}{4} a_{nx}, \quad (5.16)$$

$$f_y = 0.5\rho C_{\text{ск}} D v_n v_{ny} - \rho C_{\text{ин}} \frac{\pi D^2}{4} a_{ny}, \quad (5.17)$$

$$f_z = 0.5\rho C_{\text{ск}} D v_n v_{nz} + \rho C_{\text{ин}} \frac{\pi D^2}{4} a_{nz}. \quad (5.18)$$

Суммарная волновая нагрузка на единицу длины цилиндра, расположенного под углами φ и θ к направлению волнового потока, равна

$$f = \pm \sqrt{(f_x^2 + f_y^2 + f_z^2)}. \quad (5.19)$$

В выражении (5.19) знак суммарной нагрузки зависит от знаков составляющих f_x , f_y и f_z .

Представленные зависимости, относящиеся к вертикальным и произвольно ориентированным обтекаемым элементам, используются для определения максимальных волновых нагрузок от регулярного волнения на отдельные элементы сооружения. Максимальные нагрузки на сооружение в целом определяются для различных моментов времени путем суммирования нагрузок, рассчитанных для этих моментов на отдельные его элементы.

Исходные данные

1. Глубина моря около сооружения H , м.
2. Параметры волнения (по результатам работы № 2):
 - средняя высота $\bar{h}$, м;
 - средняя длина $\bar{\lambda}$, м;
 - средний период $\bar{\tau}$, с.
3. Буровая платформа представляется в виде верхнего строения и опорного основания (см. рис. 5.1). Все четыре стороны сооружения идентичны. Верхние горизонтальные элементы сооружения располагаются выше уровня взволнованной поверхности и не подвергаются волновому воздействию.
4. Параметры сооружения:
 - размеры сооружения l_1 , l_2 и l_3 , м;
 - внешний диаметр вертикальных элементов D_1 (м) и толщина их стенок d_1 (м);
 - внешний диаметр горизонтальных и наклонных элементов D_2 (м) и толщина их стенок d_2 (м);
 - массы платформы G_1 (т) и опорного основания G_2 (т) сооружения;
 - вертикальные колонны заполнены водой до уровня невозмущенной поверхности.
5. Жесткость сооружения $K = 16$ МН/м.
6. Коэффициенты скоростного $C_{ск} = 1.0$ и инерционного $C_{ин} = 2.0$ сопротивлений.
7. Коэффициент сопротивления $C = 4.20 \cdot 10^5$ кг/с.

Порядок выполнения работы

1. Определить параметры волны (частоту волны ω и волновое число k_H).

2. Рассчитать превышение уровня волновой поверхности η .

Согласно теории волн малой амплитуды, расчет превышения уровня волновой поверхности выполняется по уравнению (5.8) для точек пересечения профиля волны с вертикальными колоннами сооружения и его наклонными элементами (фронтальными, тыловыми и боковыми сторонами) для момента времени $\omega t = 6.0$ (рис. 5.3), при котором в первом приближении можно принять, что волновые нагрузки на сооружение максимальны.

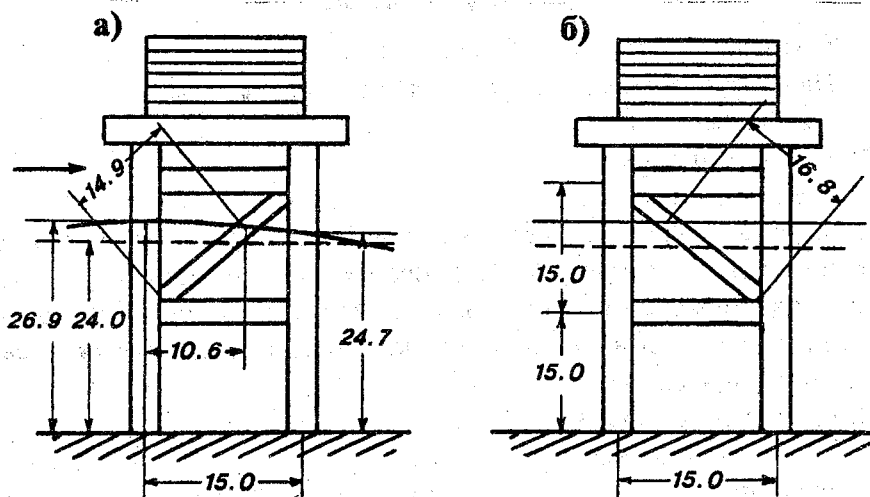


Рис. 5.3. Основание буровой платформы и ее параметры.
а - боковая сторона; б - фронтальная сторона.

Начало координат – в точке 1 опорного основания (см. рис. 5.1). Направление движения волны совпадает с осью x .

Точка пересечения уровня волновой поверхности с наклонными элементами боковых сторон ферменного основания определяется на заданный момент времени ($\omega t = 6.0$) итерационным методом путем решения системы уравнений для превышения уровня взволнованной поверхности и прямой, описывающей наклонные элементы боковых сторон сооружения:

$$z = H + \frac{h}{2} \cos(\omega t - kx),$$

$$z = l_2 + x \operatorname{tg} \varphi. \quad (5.19)$$

3. Определить присоединенную массу сооружения m' .

Присоединенная масса сооружения определяется суммированием присоединенных масс, рассчитанных по формуле (5.1) для погонной массы отдельно для всех элементов, находящихся в воде до уровня спокойного моря (кроме горизонтальных элементов боковых сторон, расположенных параллельно направлению потока и поэтому не испытывающих волнового давления). Для горизонтальных элементов фронтальной и тыловой сторон сооружения присоединенные массы определяются (для упрощения вычислений) без учета диаметра вертикальных колонн.

Для наклонных элементов расчет присоединенной массы проводится на длину смоченного элемента (до уровня спокойного моря) для фронтальной и тыловой сторон сооружения и на высоту — для боковых сторон ферменного сооружения также без учета диаметра элементов сооружения, сходящихся в узлах соединения.

4. Рассчитать массу воды в вертикальных колоннах.

Масса воды в вертикальных колоннах рассчитывается с учетом толщины стенок колонн и до уровня спокойного моря.

5. Определить приведенную массу сооружения m .

Приведенная масса определяется суммированием массы платформы и половины (суммы массы опорного основания с учетом присоединенной массы и массы воды в вертикальных колоннах.)

6. Определить параметры сооружения (собственную частоту колебаний сооружения ω_0 и коэффициент затухания системы β/ω_0).

Параметры сооружения определяются по значениям жесткости сооружения K , коэффициента сопротивления C и рассчитанной приведенной массы сооружения m .

7. Рассчитать коэффициент динамичности k_d сооружения.

Коэффициент динамичности определяется по формуле (5.2).

Определить допустимость использования статического метода расчета волновых нагрузок на сооружение.

8. Определить горизонтальные волновые нагрузки на элементы сооружения.

Волновые нагрузки для всех элементов сооружения рассчитываются на момент времени $\omega t = 6.0$ с учетом расстояния от оси передней колонны, т.е. $\omega t = 6.0$ при $x \neq 0$ в формулах (5.5)–(5.7) следует заменить на $(\omega t - kx)$.

Равнодействующие волновые нагрузки на вертикальные колонны рассчитываются по формулам (5.5)–(5.7) или по уравнению (5.4). В последнем случае для определения равнодействующих волновых нагрузок выполняется интегрирование по смоченной длине колонны рассчитанных по уравнению (5.4) на различных горизонтах удельных нагрузок по определенным на этих же горизонтах значениям составляющих скорости и ускорения жидкости (уравнения (5.9)).

Горизонтальные волновые нагрузки на горизонтальные элементы сооружения (фронтальные и тыловые), находящиеся в воде, рассчитываются по уравнению (5.16) с учетом скорости и ускорения жидкости

(см. уравнения (5.9)) на горизонте расположения элемента. Общие горизонтальные нагрузки на эти элементы определяются путем умножения рассчитанных удельных волновых нагрузок на их длину (без учета диаметра вертикальных колонн) в предположении, что рассчитанные удельные волновые нагрузки постоянны на отдельных участках элемента сооружения.

Общие горизонтальные волновые нагрузки на наклонные элементы сооружения определяются интегрированием удельных волновых нагрузок (формула (5.16)), рассчитанных для нескольких участков элемента (например, для четырех участков), и при постоянных в пределах выделенных участков составляющих скорости и ускорения жидкости, определенных по формулам (5.13)–(5.15) для середины этих участков, и с учетом расстояний x центров участков элемента от фронтальной стороны сооружения.

9. Определить суммарную горизонтальную волновую нагрузку на основание ферменного сооружения.

Суммарная равнодействующая волновая нагрузка определяется суммированием горизонтальных волновых нагрузок на все элементы основания сооружения для выбранного момента времени.

10. Анализ результатов.

Пример выполнения работы

В а р и а н т 31

Исходные данные

$K = 16 \text{ МН/м;}$	Глубина у сооружения $H = 24.00 \text{ м;}$
$C_{\text{ск}} = 1.0;$	Средняя высота волн $\bar{h} = 6.00 \text{ м;}$
$C_{\text{ин}} = 2.0;$	Средняя длина волн $\lambda = 90.00 \text{ м;}$
$C = 4.20 \cdot 10^5 \text{ кг/с;}$	Средний период волн $\bar{\tau} = 7.85 \text{ с;}$
$\omega t = 6.0.$	

Параметры сооружения

$D_1 = 1.22 \text{ м,}$	$d_1 = 0.04 \text{ м,}$	$D_2 = 0.61 \text{ м,}$	$d_2 = 0.01 \text{ м,}$	$l_1 = l_2 = l_3 = 15.00 \text{ м.}$
$G_1 = 230 \text{ т,}$	$G_2 = 220 \text{ т,}$			

$\omega = 0.800 \text{ с}^{-1},$	$k_H = 0.070 \text{ м}^{-1},$	$\beta/\omega_0 = 0.078;$
$\omega_0 = 5.905 \text{ с}^{-1},$	$\beta = 0.458 \text{ с}^{-1}.$	$k_d = 1.018.$

Присоединенные массы:

Вертикальных колонн	28.79 т	115.14 т
Горизонтальных элементов	4.50 т	9.00 т
Наклонных фронтальных и тыловых элементов	3.82 т	7.63 т
Наклонных боковых элементов	2.70 т	5.40 т

$$m' = 137.17 \text{ т}$$

Масса воды в колоннах

25.13 т 100.54 т

Приведенная масса сооружения

$m = 458.85$ т

Результаты расчетов горизонтальных волновых нагрузок на сооружение
при $\omega t = 6.0$

Вертикальные колонны

фронтальные (2)	$x = 0$ м	$z = 24.0 + 2.9 = 26.9$ м	$F_{vf} = 108.624$ кН
тыловые (2)	$x = 15$ м	$z = 24.0 + 0.7 = 24.7$ м	$F_{vt} = 138.265$ кН

Горизонтальные элементы

	x м	z м	v_x м/с	v_z м/с	a_x м/с ²	a_z м/с ²	
фронтальный (1)	0.0	15.0	1.43	0.33	0.33	-0.89	$F_{gf} = 9.906$ кН
тыловой (1)	15.0	15.0	0.36	1.13	1.16	-0.22	$F_{gt} = 11.809$ кН

Наклонные элементы

фронтальный (1) $\theta = -90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $l = 16.80$ м,

x м	z м	v_x м/с	v_z м/с	a_x м/с ²	a_z м/с ²	
0.0	16.49	1.56	0.37	0.36	-1.02	
0.0	19.46	1.85	0.47	0.43	-1.30	
0.0	22.43	2.23	0.60	0.52	-1.64	
0.0	25.40	2.71	0.74	0.63	-2.05	$F_{nf} = 21.931$ кН

тыловой (1) $\theta = -90^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $l = 13.74$ м,

x м	z м	v_x м/с	v_z м/с	a_x м/с ²	a_z м/с ²	
15.0	16.21	0.38	1.26	1.24	-0.25	
15.0	18.64	0.44	1.54	1.43	-0.30	
15.0	21.07	0.51	1.87	1.66	-0.37	
15.0	23.50	0.59	2.25	1.94	-0.44	$F_{nt} = 14.871$ кН

боковые (2) $\theta = 0^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $x = 10.56$ м, $l = 14.93$ м, $h = 25.56$ м,

x м	z м	v_x м/с	v_z м/с	a_x м/с ²	a_z м/с ²	
1.3	16.32	1.49	0.48	0.47	-0.97	
4.0	18.96	1.59	0.86	0.80	-1.10	
6.6	21.60	1.62	1.36	1.20	-1.18	
9.2	24.24	1.57	1.96	1.68	-1.17	$F_{nb} = 20.036$ кН

Суммарная волновая нагрузка при $\omega t = 6.0$

$F_x = 325.441$ кН

Литература

1. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. – Л.: Судостроение, 1986. – 286 с.
2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты. – Л.: Изд. ВНИИГ, 1990. – 432 с.
3. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82. – М.: Госстрой СССР, 1989. – 40 с.
4. Халфин И.Ш. Воздействия волн на морские нефтегазопромысловые сооружения. – М.: Недра, 1990. – 311 с.

Работа № 6

Динамический расчет морских гидротехнических сооружений при случайном (нерегулярном) волнении

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой расчета морских гидротехнических сооружений при случайном (нерегулярном) волнении в глубоководной зоне.
2. Определить спектральные плотности колебаний частиц, горизонтальных составляющих скорости и ускорения.
3. Определить спектральную плотность полной сосредоточенной волновой нагрузки на гидротехническое сооружение и ее дисперсию.
4. Определить реакцию сооружения, расположенного в глубоководной зоне, и амплитуду его колебания (1%-ной обеспеченности) при воздействии волновых нагрузок.

В ряде районов шельфа большое распространение получили глубоководные свайные конструкции для разработки залежей нефти, газа и других полезных ископаемых под морским дном, элементы подводной части которых подвергаются значительным силовым воздействиям штормов. Основной, подверженный волновому воздействию, элемент этих конструкций представляет собой цилиндрический стержень малого (по сравнению с длиной набегающей волны) диаметра, в связи с чем и возникает задача изучения волновой нагрузки на такой стержень. Поскольку сам стержень вносит малое возмущение в исходное волновое движение, решение этой задачи зависит от правильного понимания кинематической структуры прогрессивной ветровой волны.

Расчет свайных конструкций, подверженных интенсивному воздействию ветровых волн в условиях жесткого шторма, предусматривает оценку гидродинамических сил, действующих на цилиндри-

ческий стержень при набегании на него прогрессивных волн. К настоящему времени сформулировано два подхода к решению вопроса воздействия ветровых волн на сооружения. Первый, классический, подход состоит в замене набегающих на сооружение нерегулярных волн (наблюдаемых в натурных условиях) регулярными. Главный недостаток этого подхода в том, что не учитываются случайный характер волнового процесса и реакции сооружения на воздействие волн. При втором подходе волны и волновые воздействия рассматриваются с позиций теории случайных процессов. Кроме того, часто период собственных колебаний сооружений открытого моря соизмерим с характерным периодом внешних сил, в связи с чем возникает необходимость динамических расчетов сооружений на основе спектральных характеристик волнения и возникающих при его действии нагрузок.

Полностью развитое морское волнение является случайным процессом, который обладает стационарностью и эргодичностью. Современные методы расчета сооружений основываются на допущении существования этих свойств и у производных от морского волнения (нагрузок на сооружения и их реакции на эти нагрузки), что вполне подтверждается экспериментами.

Для рассмотрения энергетической сущности случайного волнового процесса используется спектральная теория волн, которая довольно часто применяется и при расчете случайных волновых нагрузок на морские сооружения, а также реакции сооружений на волновые нагрузки. Распределение энергии между элементарными синусоидальными колебаниями (спектральными составляющими с различными частотами ω) характеризуется частотным энергетическим спектром случайных волн или функцией спектральной плотности $S(\omega)$.

Основной задачей инженерных динамических расчетов морских гидротехнических сооружений на воздействие нерегулярного волнения является расчет по статистическим характеристикам волн расчетного шторма соответствующих статистических характеристик нагрузок на сооружения и их реакции на эти воздействия (внутренних усилий, деформаций, напряжений), а также определение расчетных максимальных реакций заданного процента обеспеченности. Нормативные значения расчетного процента обеспеченности опреде-

ляются классом сооружения или соображениями обеспечения его надежности.

Динамический расчет морских гидротехнических сооружений выполняется в два этапа. На первом этапе определяется функция спектральной плотности волновых нагрузок на сооружение, на втором – рассчитывается спектр динамической реакции податливого сооружения при воздействии волновой нагрузки. В обоих случаях используется представление о преобразовании случайных процессов линейными динамическими системами с определенными амплитудно-частотными характеристиками (отношениями амплитуд входного и выходного сигналов, если входной сигнал является гармоническим).

Для расчета спектра волновой нагрузки $S_Q(\omega)$ через спектр волновых колебаний уровня $S_\eta(\omega)$ используется выражение [2]

$$S_Q(\omega) = |\Phi_Q(i\omega)|^2 S_\eta(\omega), \quad (6.1)$$

где комплексная функция $\Phi_Q(i\omega)$ – передаточная функция данной динамической системы, а ее модуль – амплитудно-частотная характеристика, представляющая собой отношение амплитуд входного $Q_0(\omega)$ и выходного $\eta_0(\omega)$ процессов:

$$|\Phi_Q(i\omega)| = \frac{Q_0(\omega)}{\eta_0(\omega)}. \quad (6.2)$$

Аналогично с помощью линейной динамической системы определяется спектр динамической реакции сооружения. На вход системы в этом случае подается волновая нагрузка, характеризуемая спектром $S_Q(\omega)$, а на выходе определяется реакция системы (усилия, напряжения и перемещения).

При определении функции спектральной плотности волновых нагрузок, сосредоточенных в различных точках опоры, также основываются на линейной спектральной теории волн.

Одномерную функцию спектральной плотности волновых колебаний можно определить по формуле, предложенной Ю.М. Крыловым [1,2]:

$$S_\eta(\omega, 0) = 0.0795 \bar{h}^2 \bar{\tau} (\omega / \bar{\omega}_D)^{-7} \exp[-0.785 (\omega / \bar{\omega}_D)^{-4}], \quad (6.3)$$

где $\bar{h}$ – средняя высота волн, м; $\bar{\tau}$ – средний период волн, с; $\bar{\omega}$ – средняя круговая частота волн, рад/с.

Спектральные плотности колебаний частиц η , горизонтальных составляющих скорости $v(z)$ и ускорения $a(z)$ на горизонте z выражаются через их значения на поверхности по формулам [1]

$$S_{\eta}(\omega, z) = S_{\eta}(\omega, 0) \exp\left(-\frac{2\omega^2 z}{g}\right), \quad (6.4)$$

$$S_v(\omega, z) = \omega^2 S_{\eta}(\omega, z) = \omega^2 S_{\eta}(\omega, 0) \exp\left(-\frac{2\omega^2 z}{g}\right), \quad (6.5)$$

$$S_a(\omega, z) = \omega^4 S_{\eta}(\omega, z) = \omega^4 S_{\eta}(\omega, 0) \exp\left(-\frac{2\omega^2 z}{g}\right). \quad (6.6)$$

Средние квадратические отклонения случайных функций $\eta(z)$, $v(z)$ и $a(z)$ определяются из дисперсии этих величин после интегрирования спектров (6.4)–(6.6) по частоте ω от 0 до ∞ .

Для инженерных расчетов используется также понятие стандарта характеристик нерегулярного волнения. Изменение стандартов перемещений частиц, скорости и ускорения по глубине при нерегулярном волнении на глубокой воде может быть представлено в виде [1]

$$\sigma_v(r) = \sigma_{\eta}(0) \bar{\omega} k_v(r), \quad (6.7)$$

$$\sigma_a(r) = \sigma_{\eta}(0) \bar{\omega}^2 k_a(r), \quad (6.8)$$

где $\sigma_{\eta}(0) = h/\sqrt{2\pi}$ – среднее квадратическое отклонение колебаний уровня; $r = (\omega^2 z_i)/g$ – безразмерный параметр глубины; $k_v(r)$ и $k_a(r)$ – параметры затухания стандартов, определяемые численным интегрированием или с использованием графиков (рис. 6.1); g – ускорение свободного падения.

Волновые нагрузки определяются в сечении опор на различных горизонтах. Горизонтальные удельные случайные нагрузки выражаются в виде суммы скоростной и инерционной составляющих. В результате полная волновая нагрузка на цилиндрический элемент конструкции на горизонте z_i определяется по формуле

$$q(z_i, t) = q_{\text{ск}}(z_i, t) + q_{\text{ин}}(z_i, t), \quad (6.9)$$

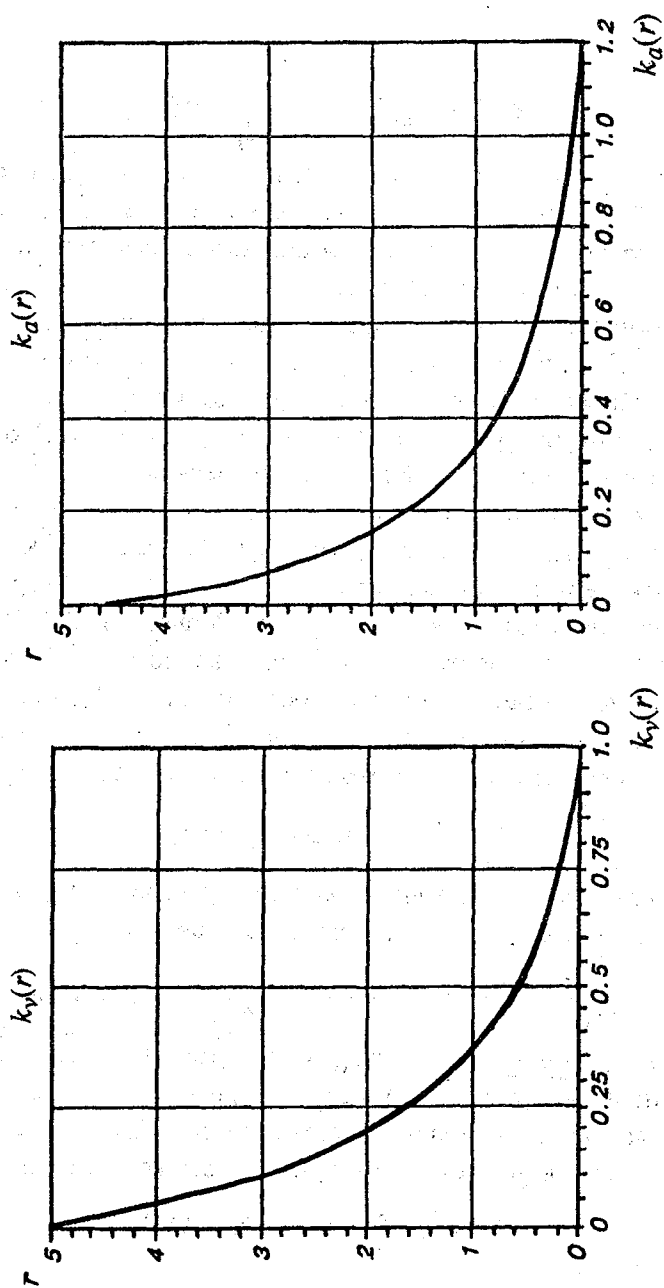


Рис. 6.1. Коэффициенты затухания стандартов горизонтальных составляющих орбитальной скорости $k_v(r)$ и ускорения $k_a(r)$.

где

$$q_{\text{ск}}(z_i, t) = dv(z_i, t)|v(z_i, t)|;$$

$$q_{\text{ин}}(z_i, t) = ba(z_i, t);$$

$$d = \frac{1}{2} \rho D C_{\text{ск}}; \quad b = \frac{1}{4} \rho \pi D^2 C_{\text{ин}};$$

D - диаметр цилиндрического элемента; ρ - плотность морской воды, равная 1026 кг/м³; $C_{\text{ск}}$ и $C_{\text{ин}}$ - скоростной и инерционный коэффициенты, которые для крупноцилиндрических сечений принимаются равными соответственно 0.7 и 2.0.

При расчетах рассматриваются сосредоточенные волновые нагрузки, приложенные в некоторых точках опор, которые предварительно разбиваются по высоте на отдельные участки [1].

Функции распределения случайных удельных волновых нагрузок на жесткие опоры в общем случае отличаются от нормального закона распределения. Исключением является вариант, при котором преобладает инерционная составляющая нагрузки, линейно зависящая от ускорений и тем самым от амплитуды волн. Скоростная составляющая нагрузки является нелинейной функцией скорости. Применение аппарата спектральной теории возможно в данном случае только после линеаризации этой составляющей. С помощью метода статистической линеаризации получено выражение для функции скоростной составляющей сосредоточенной волновой нагрузки

$$Q_{\text{ск}}(z_i, t) = \sqrt[3]{3} \sigma_v(z_i) d_i \Delta z_i v(z_i, t). \quad (6.10)$$

В результате линеаризованная функция полной сосредоточенной волновой нагрузки записывается в виде

$$Q_{\text{ск}}(z_i, t) = \sqrt[3]{3} \sigma_v(z_i) d_i \Delta z_i v(z_i, t) + \frac{1}{4} \rho \pi D^2 C_{\text{ин}} \Delta z_i a(z_i, t). \quad (6.11)$$

Если рассматривать лишь автоспектральные плотности удельных волновых нагрузок на различных горизонтах, то можно получить выражение для спектральной плотности сосредоточенной волновой нагрузки, используя спектральные плотности ее составляющих:

$$\begin{aligned} S_Q(\omega, z) &= S_{Q_{\text{ск}}}(\omega, z) + S_{Q_{\text{ин}}}(\omega, z) = \\ &= \left[\sqrt{3} \sigma_v(z) d_i \Delta z_i \right]^2 S_v(\omega, z) + b_i^2 (\Delta z_i)^2 S_a(\omega, z) = \end{aligned}$$

$$= \left[3d_i^2 (\Delta z_i)^2 \sigma_v^2(z) + b_i^2 (\Delta z_i)^2 \omega^2 \right] \omega^2 S_\eta(\omega, 0) \exp\left(\frac{-2\omega^2 z}{g}\right). \quad (6.12)$$

Дисперсия же нагрузки на горизонте z определяется как

$$D_{Q,i}(z_i) = \int_0^\infty S_Q(\omega, z) d\omega. \quad (6.13)$$

При расчете учитывается только первая (основная) форма колебаний сооружения и соответственно основной период свободных колебаний.

На втором этапе динамического расчета глубоководных сквозных гибких сооружений по статистическим характеристикам волн расчетного шторма и рассчитанным спектральным характеристикам волновых нагрузок определяются статистические характеристики реакции сооружения (внутренние усилия, деформации и напряжения) и рассчитываются максимальные его реакции заданного процента обеспеченности. Сооружения при этом рассматриваются как консольные стержни и плоские рамные конструкции с конечным числом степеней свободы, что достигается сосредоточением масс системы в характерных точках (узлах) опор.

Для расчета максимальных значений реакции сооружения заданного процента обеспеченности определяются средние квадратические отклонения реакции сооружения σ_R и безразмерные функции обеспеченности ординат реакции и амплитуд (рис. 6.2) [1]:

$$n_R = R/\sigma_R = F(P\%), \quad n_A = A_R/\sigma_R = F(P\%), \quad (6.14)$$

где R и A_R — соответственно ордината реакции и амплитуда смещения сооружения.

По заданному проценту обеспеченности, нормативное значение которого определяется в зависимости от класса сооружения, рассчитываются максимальные значения ординат и амплитуд:

$$R_{P\%} = n_{R,i} \cdot \sigma_R, \quad A_{R,i\%} = n_{A,i} \cdot \sigma_R. \quad (6.15)$$

Для определения среднего квадратического отклонения реакции сооружения σ_R вычисляется дисперсия D_R через спектр реакции $S_R(\omega)$ путем интегрирования его по области действительных частот от 0 до ∞ . Для определения спектра динамической реакции гибкого

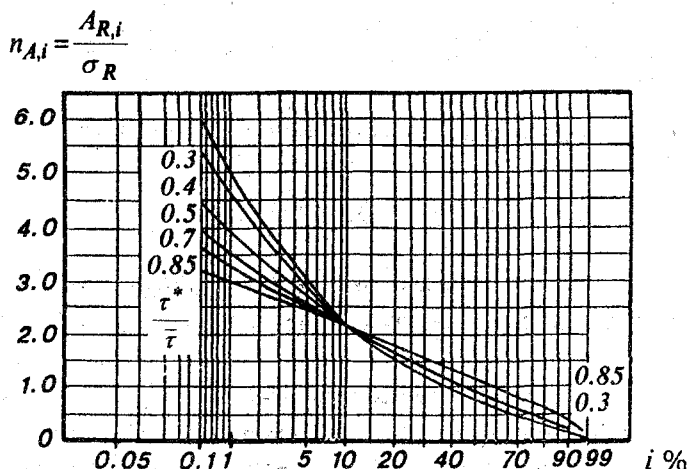


Рис. 6.2. Зависимость безразмерных функций обеспечения амплитуд динамических реакций от податливости сооружения.

сквозного сооружения при воздействии нерегулярных волн рассматривается линейная динамическая система, на вход которой подаются случайные воздействия – волновые нагрузки, характеризующиеся некоторым частотным спектром. На выходе системы рассматриваются ее случайные реакции (усилия, напряжения и перемещения), спектры которых определяются умножением частотного спектра волновых нагрузок на квадрат амплитудно-частотных характеристик соответствующих реакций. Амплитудно-частотная характеристика динамической системы “нагрузка–реакция сооружения” в случае гармонической нагрузки определяется как отношение амплитуд реакции и нагрузки. Тогда спектр реакции [2]

$$S_R(\omega) = \Phi_R^2(\omega) S_Q(\omega), \quad (6.16)$$

а дисперсия реакции

$$D_R = \int_0^{\infty} S_R(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \Phi_R^2(\omega) S_Q(\omega) d\omega. \quad (6.17)$$

Для системы с одной степенью свободы выражение амплитудно-частотной характеристики при линеаризованной полной волновой нагрузке имеет вид

$$\Phi_R(\omega) = \frac{1}{m\omega_0^2 \sqrt{\left[1 - (\omega/\omega_0)^2\right]^2 + (2\beta\omega/\omega_0^2)}}, \quad (6.18)$$

где ω_0 – частота свободных колебаний сооружения; m – приведенная масса сооружения.

Исходные данные

1. Глубина моря около сооружения H (м).
2. Параметры волн расчетного шторма (по результатам работы № 2):

- средняя высота волн $\bar{h}$ (м);
- средний период волн $\bar{\tau}$ (с).

3. Параметры сооружения (по результатам работы № 5):

- диаметр колонны D (м);
- приведенная масса сооружения m (т).

Сооружение представляется как П-образная рамная система с конечным числом степеней свободы. Массы опор сооружения сосредоточены в характерных точках (узлах соединения элементов).

Порядок выполнения работы

1. Определить параметры волнения (круговую частоту волны ω) и сооружения (частоту свободных колебаний ω_0 , параметр β и коэффициент затухания β/ω_0).

Средняя круговая частота волны определяется по периоду волны, определенному в работе № 2. Собственная частота колебаний сооружения ω_0 и коэффициент затухания β/ω_0 рассчитываются по формулам, приведенным в работе № 5: $\omega_0 = \sqrt{K/m}$; $\beta = 0.5(C/m)$ (K – жесткость сооружения, $K = 16$ МН/м; C – коэффициент сопротивления, $C = 4.20 \cdot 10^5$ кг/с; m – приведенная масса сооружения).

2. Рассчитать функцию спектральной плотности волновых колебаний на поверхности $S_\eta(\omega, 0)$.

Функция спектральной плотности волновых колебаний на поверхности рассчитывается по формуле (6.3). Расчеты всех спектральных характеристик выполняются по круговой частоте в пределах от 0 до 2.0 рад/с с шагом 0.20 рад/с.

3. Рассчитать функции спектральной плотности колебаний час-

тиц $S_p(\omega, z)$, горизонтальных составляющих скорости $S_v(\omega, z)$ и ускорения $S_a(\omega, z)$ на различных горизонтах.

Функции спектральной плотности характеристик волнения рассчитываются по формулам (6.4)–(6.6). Горизонты расчетов выбираются через 5–10 м и относятся к середине слоев одинаковой толщины по всей глубине моря. Начало координат – на поверхности моря.

4. Определить изменения стандартов горизонтальных составляющих скорости и ускорения по глубине $\sigma_v(r)$ и $\sigma_a(r)$.

Изменения стандартов $\sigma_v(r)$ и $\sigma_a(r)$ рассчитываются по формулам (6.7)–(6.8). Коэффициенты $k_v(r)$ и $k_a(r)$ определяются с использованием графиков (см. рис. 6.1) по рассчитанным значениям параметра r для всех горизонтов расчета.

5. Определить спектральную плотность полной волновой нагрузки $S_Q(\omega, z)$.

Расчеты выполняются по формуле (6.12) для каждого расчетного горизонта. Толщина слоя Δz_i определяется между расчетными горизонтами и является постоянной по всей глубине моря.

6. Определить дисперсию полной волновой нагрузки $D_Q(\omega, z)$.

Дисперсия полной волновой нагрузки рассчитывается путем интегрирования в действительном диапазоне частот (от 0 до 2.0 рад/с) функции спектральной плотности волновой нагрузки (6.13) на всех расчетных горизонтах.

7. Рассчитать функцию спектральной плотности реакции сооружения $S_R(\omega, 0)$, дисперсию $D_R(\omega)$ и среднее квадратическое отклонение σ_R для верхнего расчетного слоя.

Для определения функции спектральной плотности (6.16), дисперсии (6.17) и среднего квадратического отклонения реакции сооружения рассчитывается амплитудно-частотная характеристика $\Phi_R(\omega)$ с использованием формулы (6.19). Среднее квадратическое отклонение реакции сооружения определяется из дисперсии реакции.

8. Определить максимальное смещение верхней части сооружения x и период ее смещения τ^* .

Максимальное смещение верха сооружения определяется по величине σ_R из выражения $x = \sqrt{2\pi\sigma_R^2}$, а период его смещения – по значению периода собственных колебаний сооружения ω_0 ($\tau^* = 2\pi/\omega_0$).

9. Определить амплитуду смещения платформы 1%-ной обеспеченности.

Амплитуда смещения платформы определяется из выражения (6.15) по среднему квадратическому отклонению σ_R и значению параметра n_d (1%-ной обеспеченности), определенного из графика (рис. 6.2) по семейству кривых, отвечающих различным значениям $\tau^*/\bar{\tau}$ ($\bar{\tau}$ - период волны).

10. Построение графиков и анализ результатов.

По результатам расчетов строятся и анализируются графики функций спектральной плотности колебаний частиц на поверхности и по глубине, функции спектральной плотности скорости и ускорения на различных горизонтах, функции спектральной плотности волновой нагрузки и реакции сооружения.

Пример выполнения работы

Исходные данные

Глубина моря $H=50.0$ м,

Средняя высота волны $\bar{h}=6.00$ м, Средний период волны $\bar{\tau}=7.85$ с,

Диаметр колонны $D=1.22$ м, Приведенная масса $m=458.850$ т

Параметры волны и сооружения

$\omega = 0.800$ рад/с,

$\omega_0 = 5.905$ с⁻¹, $\beta = 0.458$ с⁻¹,

Коэффициент затухания $\beta/\omega_0 = 0.078$.

Спектральная плотность волновых колебаний (см. рис. 6.3)

ω	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
$S_\eta(\omega, 0)$	0.000	0.000	0.010	14.060	10.268	3.426	1.130	0.412	0.168	0.075	0.036

Число расчетных горизонтов 5

Спектральные плотности колебаний частиц, скорости и ускорения

$z = 5.0$ м											
ω	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
$S_\eta(\omega)$	0.000	0.000	0.008	9.741	5.347	1.236	0.260	0.056	0.012	0.003	0.001
$S_v(\omega)$	0.000	0.000	0.001	3.507	3.422	1.236	0.375	0.110	0.032	0.009	0.002
$S_a(\omega)$	0.000	0.000	0.000	1.262	2.190	1.236	0.540	0.215	0.081	0.029	0.010

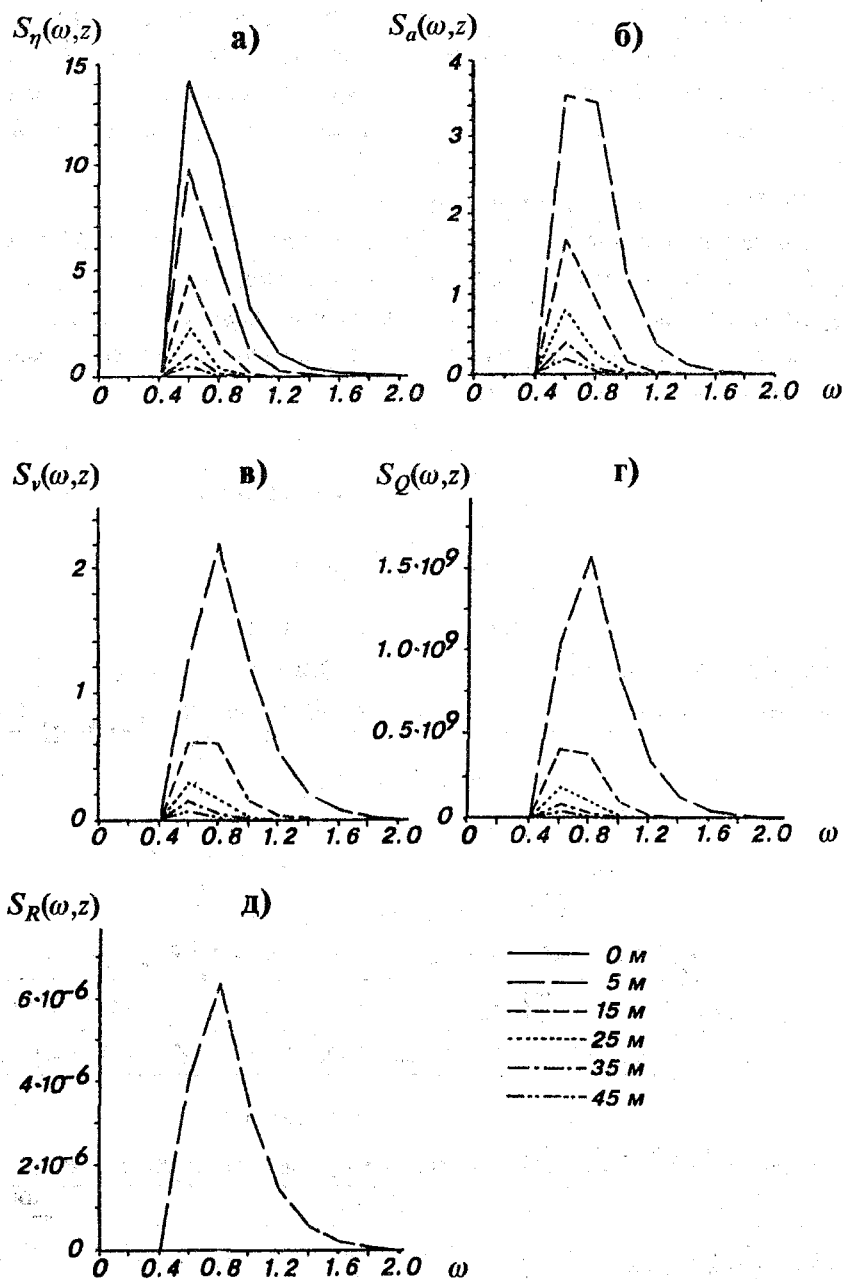


Рис. 6.3. Функции спектральной плотности колебаний (а), скорости (б) и ускорения (в) жидкости, волновой нагрузки (г) и реакции сооружения (д) в поверхностном слое на нагрузку.

1,4 · 10⁻⁶ 1,2 · 10⁻⁶
0,4 · 10⁻⁶ Продолжение

z = 15.0 м											
$S_{\eta}(\omega)$	0.000	0.000	0.006	4.676	1.450	0.161	0.014	0.001	0.000	0.000	0.000
$S_v(\omega)$	0.000	0.000	0.001	1.683	0.928	0.161	0.020	0.002	0.000	0.000	0.000
$S_a(\omega)$	0.000	0.000	0.000	0.606	0.594	0.161	0.029	0.004	0.000	0.000	0.000
z = 25.0 м											
$S_{\eta}(\omega)$	0.000	0.000	0.004	2.244	0.393	0.021	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_v(\omega)$	0.000	0.000	0.001	0.808	0.252	0.021	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_a(\omega)$	0.000	0.000	0.000	0.291	0.161	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
z = 35.0 м											
$S_{\eta}(\omega)$	0.000	0.000	0.003	1.077	0.107	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_v(\omega)$	0.000	0.000	0.001	0.388	0.068	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_a(\omega)$	0.000	0.000	0.000	0.140	0.044	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
z = 45.0 м											
$S_{\eta}(\omega)$	0.000	0.000	0.002	0.517	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_v(\omega)$	0.000	0.000	0.000	0.186	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$S_a(\omega)$	0.000	0.000	0.000	0.067	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

z м	σ_0	r	$k_v(r)$	$k_a(r)$	σ_v	σ_a
5.00	2.394	0.327	0.649	0.703	1.243	1.078
15.00	2.394	0.980	0.382	0.350	0.732	0.537
25.00	2.394	1.633	0.249	0.196	0.477	0.300
35.00	2.394	2.286	0.167	0.121	0.320	0.185
45.00	2.394	2.939	0.109	0.070	0.209	0.107

$$d = 438.102, \quad b = 2398.761$$

Спектральная плотность полной волновой нагрузки

z м	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
5.0	0.0	0.0	$2.4 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^9$	$8.2 \cdot 10^8$	$3.4 \cdot 10^8$	$1.3 \cdot 10^8$	$4.9 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^7$	$5.9 \cdot 10^6$
15.0	0.0	0.0	$1.2 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^8$	$3.7 \cdot 10^8$	$9.8 \cdot 10^7$	$1.7 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^5$	$2.3 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^3$
25.0	0.0	0.0	$7.4 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^8$	$9.6 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^7$	$8.9 \cdot 10^5$	$4.2 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^3$	$3.1 \cdot 10^1$	$4.7 \cdot 10^{-1}$
35.0	0.0	0.0	$4.9 \cdot 10^4$	$8.3 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^6$	$4.7 \cdot 10^4$	$7.7 \cdot 10^2$	$7.4 \cdot 10^0$	$4.1 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$
45.0	0.0	0.0	$3.4 \cdot 10^4$	$3.9 \cdot 10^7$	$6.9 \cdot 10^6$	$2.1 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^1$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$5.6 \cdot 10^{-5}$	0.0

Дисперсия волновой нагрузки

$z = 5.00$	$D_Q(z) = 7.944 \cdot 10^8$
$z = 15.00$	$D_Q(z) = 1.777 \cdot 10^8$
$z = 25.00$	$D_Q(z) = 5.746 \cdot 10^7$
$z = 35.00$	$D_Q(z) = 2.197 \cdot 10^7$
$z = 45.00$	$D_Q(z) = 9.228 \cdot 10^6$

Спектральная плотность реакции сооружения

ω	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
$\Phi_R(z)$	$6.25 \cdot 10^{-8}$	$6.26 \cdot 10^{-8}$	$6.28 \cdot 10^{-8}$	$6.31 \cdot 10^{-8}$	$6.37 \cdot 10^{-8}$	$6.43 \cdot 10^{-8}$
$S_R(z)$	0.00	0.00	$9.58 \cdot 10^{-10}$	$4.14 \cdot 10^{-6}$	$6.34 \cdot 10^{-6}$	$3.40 \cdot 10^{-6}$
ω	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	
$\Phi_R(z)$	$6.52 \cdot 10^{-8}$	$6.62 \cdot 10^{-8}$	$6.74 \cdot 10^{-8}$	$6.88 \cdot 10^{-8}$	$7.05 \cdot 10^{-8}$	
$S_R(z)$	$1.46 \cdot 10^{-6}$	$5.84 \cdot 10^{-7}$	$2.24 \cdot 10^{-7}$	$8.25 \cdot 10^{-8}$	$2.91 \cdot 10^{-8}$	

Реакция сооружения

Дисперсия $D_R = 3.249 \cdot 10^{-6}$, $\sigma_R = 1.803 \cdot 10^{-3}$,

Смещение $x = 4.518 \cdot 10^{-3}$, $\tau^* = 1.064$,

$\tau^* / \bar{\tau} = 0.136$, $n_A, 1\% = 6.2$.

Смещение сооружения (1%-ной обеспеченности): 0.0112 м

Литература

1. *Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов)*. – Л.: Изд. ВНИИГ, 1976. – 316 с.
2. *Халфин И.Ш. Воздействия волн на морские нефтегазопромысловые сооружения*. – М.: Недра, 1990. – 311 с.

Работа № 7

Расчет нагрузок на вертикальные оградительные сооружения от цунами

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой определения волновых нагрузок на гидротехнические сооружения от необрушенной волны цунами.
2. Определить параметры волн цунами с использованием различных способов их расчета.
3. Определить горизонтальные и вертикальные нагрузки, возникающие при воздействии необрушенных волн цунами на гидротехнические сооружения с учетом перелива воды.
4. Определить минимальную ширину, необходимую для устойчивости гидротехнического сооружения при воздействии волны цунами рассчитанных параметров.

Цунами, возникающие от сильных землетрясений или извержений вулканов, когда в океане происходят значительные деформации дна, являются большим бедствием для населения побережий океанов и морей. Разрушительная сила цунами на побережье зависит как от интенсивности породивших их землетрясений, так и от особенностей рельефа зоны распространения волны от очага и прибрежных участков суши. Подход волн цунами к берегу вызывает его заливание, сопровождающееся большими разрушениями. Причем размывающее и разрушающее действие волн цунами проявляется при их движении на берег и обратно в море. На участках побережья с различными рельефом дна и формой уреза воды разрушающее действие на берега и площади затопливаемых территорий будут различными.

Предотвратить возникновение цунами, как явление природы, или изменить его характер невозможно. Поэтому важной задачей является разработка мероприятий по защите от их разрушающего действия, которое проявляется, прежде всего, в разрушении защит-

ных сооружений и сооружений портов, расположенных в цунами-опасных районах. Цунамизащитные сооружения (молы, волноломы, берегозащитные стенки) должны быть устойчивыми и прочными, выдерживать статические и гидродинамические воздействия водных потоков, в том числе и при переливах. Воздействие водных масс на сооружения при цунами проявляется от гидродинамического давления, гидростатического взвешивания, размывающего действия и разрушения сооружений ударами плавающих в потоке предметов. Строить защитные и портовые гидротехнические сооружения, способные полностью противостоять разрушительному действию цунами, не экономично (требуются значительные капитальные затраты) и технически сложно. Наибольший эффект может быть достигнут за счет выбора оптимальной плановой компоновки сооружений, применения цунамистойких конструкций гидротехнических сооружений, а также с учетом форм береговых линий, подводного и надводного рельефов в приустьевой зоне [1].

Нагрузки и воздействия волн цунами на гидротехнические сооружения вертикального и откосного профилей рассчитываются от обрушенной и необрушенной волн в зависимости от интенсивности подходящей волны и относительной высоты сооружения для случая полного отражения и с учетом перелива, а также для случая, когда сооружение располагается на линии уреза или выше в пределах наката волн. При определении воздействия волн типа цунами на гидротехнические сооружения учитываются гидростатическая нагрузка от подъема уровня у сооружения, гидростатическое давление при обтекании преграды потоком воды и гидродинамическое взвешивание. Расчетная нагрузка определяется согласно разработанным нормативным документам [1].

Основными характеристиками наката волны цунами на берег являются средняя за 100 лет максимальная высота наката цунами h_{100} , максимальная высота волны на урезе воды h^* при накате волны высотой h_{10} (h_{10} - высота волны цунами на изобате 10 м), преобладающий период волны T (мин), частота цунами ν с высотой наката на берег более 0.5 м. Основные характеристики цунами приводятся на схемах цунамирайонирования побережья, в таблицах для различных пунктов или рассчитываются с использованием гидродинамических моделей.

Для определения высоты цунами на фиксированной изобате (на глубине расположения сооружения) по значению h_{100} используется график (рис. 7.1), где параметр L'/λ находится из соотношения

$$\frac{L'}{\lambda} = \frac{L'}{30\sqrt{gH_c T}}, \quad \frac{3000}{9,81 \cdot 22 \cdot 15} = 1,82$$

полученного из выражения

$$\lambda = 30\sqrt{gH_c T}, \quad 6410,106$$

где λ - длина волны, м; L' - расстояние от уреза воды до фиксированной изобаты H_c , т.е. до изобаты, на которой предполагается строительство защитного гидротехнического сооружения; T - период волны, мин. При этом следует иметь в виду, что накат волны происходит без обрушения, если $(L'/\lambda) < 0.4$.

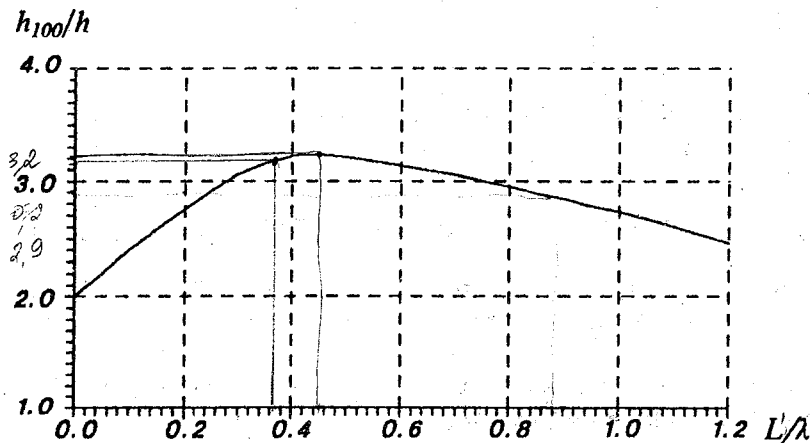


Рис. 7.1. График для определения высоты волны цунами h у сооружения.

Высота волны h на фиксированной изобате может быть также определена (при плавном изменении глубины моря) по высоте волны на урезе воды h^* и высоте волны цунами h_{10} на изобате 10 м, определенной путем решения гидродинамических уравнений, описывающих распространение цунами от его очага в сторону берега. В этом случае по числу Струхалия (St) и с использованием графика

(рис. 7.2) определяется максимальная высота h^* на урезе воды при накате волны высотой h_{10} , а затем - высота волны h_c около сооружения, расположенного на расстоянии x от уреза воды и на глубине H_c :

$$h_c = h_{10} \frac{x}{L} - h^* \frac{x-L}{L}, \quad (7.2)$$

а число Струхала определяется по формуле:

$$St = 0.25 \frac{h_{10}}{H} \left[1 + \frac{h_{10}}{H} \right] \cdot \left[\frac{L}{\lambda} \right]^2, \quad (7.3)$$

где L - расстояние от уреза воды до изобаты 10 м; x - расстояние от уреза воды до сооружения; h_{10} - высота волны на глубине 10 м. При этом предполагается линейное изменение высоты волны от сооружения до уреза воды.

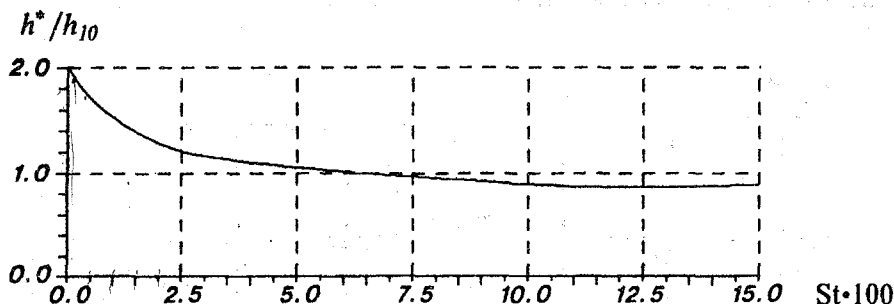


Рис. 7.2. График для определения максимальной высоты волны h^* на урезе воды при накате волны высотой h_{10} .

Превышение уровня воды над спокойным положением перед сооружением при подходе волны

$$\eta = 4H_c \left(1 + \frac{h_c}{H_c} - \sqrt{1 + \frac{h_c}{H_c}} \right). \quad (7.4)$$

Расчет сооружений вертикального типа на воздействие необрушенной волны цунами производится по эпюрам волнового давления для случаев полного отражения и с учетом перелива (рис. 7.3).

Выражения для определения горизонтальных составляющих волнового давления P (кН/м²) на сооружение с учетом перелива для ординат z (м) имеют следующий вид:

$$\text{при } z_1 = -(D_0 - H_0) \quad P_1 = \rho g [k_1 k_2 \eta - (D_0 - H_0)], \quad (7.5)$$

$$\text{при } z_2 = 0 \quad P_2 = \rho g k_1 k_2 \eta, \quad (7.6)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты, которые определяются с использованием графиков (рис. 7.4) по значению интенсивности подходящей волны k_h ($k_h = h_c/H_0$); D_0 – высота сооружения от его подошвы; H_0 – глубина перед сооружением, отсчитываемая от подошвы сооружения; ρ – плотность воды, равная 1026 кг/м³.

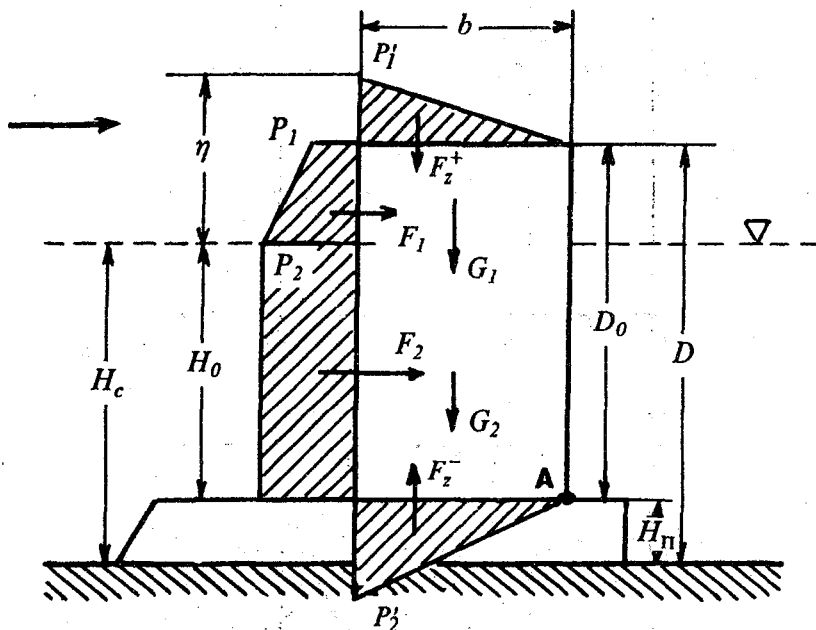


Рис. 7.3. Эпюры давления одиночной волны цунами на вертикальное сооружение с учетом перелива.

Горизонтальная нагрузка на один погонный метр сооружения определяется по площади эпюры бокового волнового давления. Вертикальная нагрузка на сооружение рассчитывается по площади эпюры волнового давления на оголовки сооружения

$$F_z^+ = \frac{P'_1 \cdot b}{2}, \quad (7.7)$$

а вертикальная нагрузка на основание сооружения определяется по площади эпюры взвешивающего волнового давления

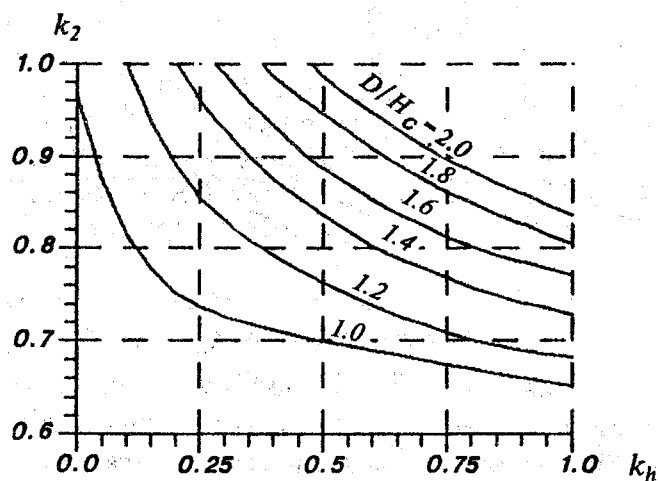
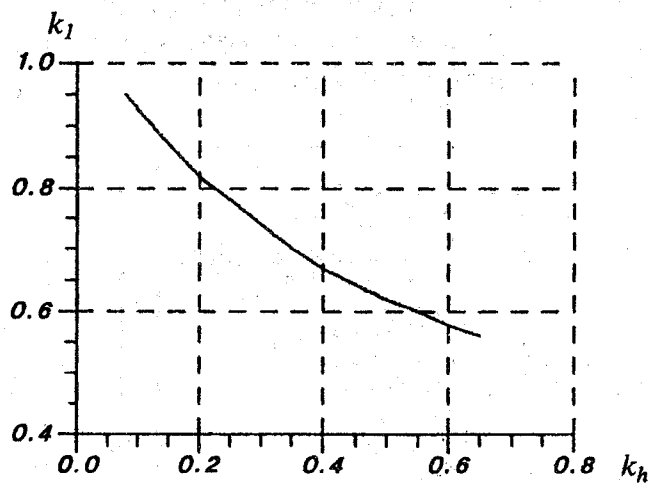


Рис. 7.4. Графики для определения коэффициентов k_1 и k_2 для расчета горизонтальных составляющих волнового давления.

$$F_z^- = \frac{P_l \cdot b}{2} \mu, \quad (7.7)$$

где b – ширина сооружения; μ – коэффициент, принимаемый по таблице 7.1 [2] (табл. 5 СНиПа 2.06.04-82).

Таблица 7.1. Значения коэффициента μ

$\frac{b}{H_c - H_0}$	≤ 3	5	7	9
μ	0.7	0.8	0.9	1.0

Исходные данные

1. Карта глубин, расположение сооружения и его параметры (*местоположение сооружения от уреза воды выбирается так, чтобы сооружение подвергалось воздействию необрушенной волны, т.е. отношение L'/λ должно быть меньше 0.4*).
2. Средняя за 100 лет максимальная высота наката волны цунами h_{100} (м) и ее период T (мин).
3. Высота волны цунами h_{10} на изобате 10 м.

Порядок выполнения работы

1. Определить высоту волны цунами на фиксированной изобате (на глубине предполагаемого строительства сооружения).

Высота волны h_c^1 определяется с использованием графика для отношения h/h_{100} (см. рис. 7.1). Расстояние L' до места предполагаемого строительства и глубина места H_c определяются по карте района. Отношение L'/λ рассчитывается по формуле (7.1).

2. Определить максимальную высоту волны на урезе воды h^* .

Высота волны на урезе воды определяется с использованием графика для отношения h^*/h_{10} (см. рис. 7.2). Число St рассчитывается по формуле (7.3). Если не имеется данных о длине волны, значение отношения L/λ также определяется по формуле (7.1), где L – расстояние до 10-метровой изобаты от уреза воды.

3. Определить высоту волны цунами у сооружения h_c^2 для волны, полученной из схемы цунамирайонирования (по высоте волны на изобате 10 м).

Высота волны цунами рассчитывается по формуле (7.2). При значительных расхождениях в результатах расчетов высот волн цунами у сооружения (т.е. при обоих способах их определения) для дальнейших расчетов за высоту волны принимается величина h_c^I , определенная с использованием графика (рис. 7.1) для отношения h/h_{100} .

4. Определить превышение уровня воды над свободной поверхностью.

Превышение уровня над свободной поверхностью определяется по формуле (7.4) для рассчитанных высот волн у сооружения h_c^I и h_c^2 .

5. Рассчитать горизонтальные и вертикальные составляющие волнового давления и построить эпюры его составляющих.

Расчеты составляющих волнового давления проводятся по формулам (7.5)–(7.8) с учетом перелива воды при $\eta + H_c > D$ (D – высота сооружения от дна (м), включая толщину постели $H_{\Pi} = 0.5h_c$ и определяемая в данном случае, как $D = H_c + \eta - 0.5$).

Значения коэффициентов k_1 и k_2 , входящих в формулы (7.5), (7.6), определяются по интенсивности волны k_h и относительной высоте сооружения D/h_c с использованием графиков (см. рис. 7.4).

6. Определить горизонтальные и вертикальные нагрузки на сооружение.

Горизонтальные нагрузки на сооружение F_1 и F_2 определяются по площади эпюры волнового давления P_1 и P_2 . Вертикальные нагрузки на оголовки F_z^+ и подошву F_z^- сооружения рассчитываются по значениям вертикальных составляющих волнового давления P_1' и P_2' по формулам (7.7)–(7.8). Коэффициент μ определяется по табл. 7.1, в которой в качестве первого приближения величины b (ширины сооружения) принимается высота сооружения, отсчитываемая от его подошвы.

Глубина моря, отсчитываемая от основания сооружения (от постели) определяется как $H_0 = H_c - H_{\Pi}$, где $H_{\Pi} = 0.5h_c$.

Расчет нагрузок проводится на один погонный метр секции сооружения в кН/м.

7. Определить минимальную ширину секции сооружения b , достаточную для сохранения его устойчивости при воздействии необрушенной волны цунами.

Ширина секции сооружения определяется из уравнения моментов сил, действующих на сооружение, относительно точки у основания сооружения (точка А, рис. 7.3), расположенной на стороне, противополо-

ложной подходу волны, с учетом веса сооружения G_1 и G_2 (G_1 - вес подводной части сооружения, G_2 - вес его надводной части). При решении уравнения моментов сил опрокидывающие силы умножаются на коэффициент устойчивости M , равный 1.7.

При расчете веса подводной части сооружения удельный вес бетона δ , равный 17.6 кН/м^3 , уменьшается на значение удельного веса морской воды.

По рассчитанным значениям ширины сооружения вновь определяются вертикальные нагрузки (для обоих способов расчета высоты волны цунами) на подошву и основание сооружения по определенному значению коэффициента μ (см. табл. 7.1), которые далее используются при решении уравнения моментов сил. Расчеты выполняются до равенства последовательно рассчитанных значений b (с точностью $\sim 0.1 \text{ м}$) по обоим способам расчета высоты волны цунами.

8. Анализ результатов.

Пример выполнения работы

В а р и а н т - 31

Высота волны наблюденная за 100 лет	$h_{100} = 5.00 \text{ м}$ <i>7,8 м</i>
Период волны	$T = 14.00 \text{ мин}$ <i>15 мин</i>
Высота волны на изобате 10 м	$h_{10} = 2.60 \text{ м}$ <i>5,5 м</i>
Глубина места	$H_c = 15.00 \text{ м}$ <i>22 м</i>
Расстояние до сооружения	$L' = 1600.0 \text{ м}$ <i>3000 м</i>
Расстояние до 10-метровой изобаты	$L = 1100.0 \text{ м}$ <i>1500 м</i>

1-й способ

$$L'/\lambda = 0.314, \text{ } 0,378$$

$$\text{По рис. 7.1 } h_{100}/h = 3.0983. \text{ } 3,2$$

Высота волны цунами у сооружения

$$h_c = 1.614 \text{ м} \text{ } 2,438$$

Глубина моря над основанием

$$H_0 = 14.193 \text{ м} \text{ } 20,781 \text{ м}$$

Высота сооружения от дна

$$D = 17.810 \text{ м} \text{ } 26,504$$

Высота сооружения от подошвы

$$D_0 = 17.003 \text{ м}$$

2-й способ

$$St = 0.573,$$

$$\text{По рис. 7.2 } h^*/h = 1.5898.$$

$$h_c = 1.903 \text{ м}$$

$$H_0 = 14.049 \text{ м}$$

$$D = 18.419 \text{ м}$$

$$D_0 = 17.468 \text{ м}$$

Толщина подушки сооружения

$$H_{\Pi} = 0.807 \text{ м}$$

$$H_{\Pi} = 0.951 \text{ м}$$

Превышение уровня у сооружения

$$\eta = 3.310 \text{ м}$$

$$\eta = 3.919 \text{ м}$$

Рис.7.3. $k_h = 0.108$,

$k_1 = 0.92, k_h = 0.127,$

$k_1 = 0.89.$

Рис.7.4. $k_h = 0.108, D/h = 1.19, k_2 = 0.98, k_h = 0.127, D/h = 1.23, k_2 = 1.00.$

Горизонтальное давление (рис. 7.5)

$$z = -(D_0 - H_0) \quad P_1 = 1.6232 \text{ кН/м}^2$$

$$P_1 = 0.8551 \text{ кН/м}^2$$

$$z = 0 \quad P_2 = 29.9065 \text{ кН/м}^2$$

$$P_2 = 35.2723 \text{ кН/м}^2$$

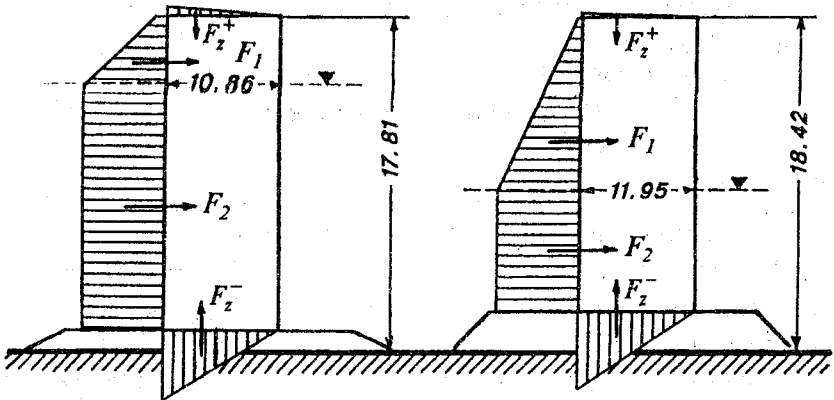


Рис. 7.5. Эпюра волнового давления, вертикальные и горизонтальные нагрузки от необрушенной волны цунами с учетом перелива.

Горизонтальные нагрузки

$$F_1 = 44.3001 \text{ кН/м}$$

$$F_1 = 61.7684 \text{ кН/м}$$

$$F_2 = 424.4665 \text{ кН/м}$$

$$F_2 = 495.5244 \text{ кН/м}$$

Табл. 7.1. $m = 1.000$

$m = 1.000$

Вертикальные нагрузки

$$F_z^+ = 0.8116 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$F_z^+ = 0.4276 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$F_z^- = 14.9533 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$F_z^- = 17.6362 \cdot b \text{ кН/м}$$

Вес сооружения

$$G_1 = 49.4570 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$G_1 = 60.1827 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$G_2 = 106.9441 \cdot b \text{ кН/м}$$

$$G_2 = 105.8549 \cdot b \text{ кН/м}$$

Ширина сооружения

$$b = 10.858 \text{ м}$$

$$b = 11.945 \text{ м}$$

Литература

1. Кульмач П.П., Филиппенко В.З. Воздействие цунами на морские гидротехнические сооружения. - М.: Транспорт, 1981. - 303 с.

2. Руководство по расчету воздействий волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования. РД 31.33.07-86. - М.: Изд. СоюзМорНИИпроект, 1986. - 48 с.

Работа № 8

Определение максимальных уровней моря редкой повторяемости

Задачи работы

1. Ознакомиться с одной из методик расчета максимального положения уровня моря для заданной акватории.
2. Рассчитать максимальные уровни моря в районе предполагаемого строительства гидротехнического сооружения 1%-ной и 0.1%-ной обеспеченности и определить доверительные интервалы экстремальных высот уровня.

При проектировании морских гидротехнических сооружений необходимо знать характеристики уровня, отражающие как его среднее значение, так и распределение высот уровня во времени. Однако первостепенное значение имеет определение максимальных высот уровня малой вероятности. Положение экстремальных отметок уровня определяет динамическое воздействие волн, течений и льда на различные элементы конструкций морских гидротехнических сооружений и на берега. От выбора проектных отметок на основании этих данных в значительной степени зависит объем, а следовательно, и стоимость строительства. Ошибка в выборе отметок снижает эффективность использования сооружения. Сведения о минимальных уровнях, кроме того, необходимы для определения нулей навигационных карт, глубин подходных каналов и на портовых акваториях.

Основным видом информации, на которой базируются выводы о повторяемости экстремальных уровней, являются выборки экстремумов высот уровней моря, составленные по материалам наблюдений. В статистическом отношении объем подобных выборок мал. В выборках по материалам наблюдений вероятности превышения наивысших значений максимумов находятся обычно в пределах 1–5 %. При выборе же проектных отметок для капитальных гидро-

технических сооружений необходимы сведения о значениях максимальных уровней с вероятностью от 1 до 0.01 %.

⟨ Для определения экстремальных уровней моря используется статистический метод расчета, основанный на асимптотической теории экстремальных значений и включает в себя [1]:

- способ приведения рядов экстремальных уровней к стационарному виду (исключение тренда);
- способ учета нерепрезентативности (выборочной изменчивости) рядов экстремальных уровней;
- расчет теоретических функций распределения экстремальных уровней;
- определение экстремальных отметок уровня и оценку их точности;
- определение экстремальных уровней редкой повторяемости с короткими рядами. ⟩

Основой статистики экстремальных значений является двойной показательный закон

$$P = \exp(-\exp[-y_p]), \quad (8.1)$$

где P – функция распределения; y_p – вспомогательная или приведенная переменная экстремальных значений, которая определенным образом связана с исследуемой статистической переменной x .

Функция распределения P связана также с периодом повторяемости соотношением

$$P = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{или} \quad 1 - P = \frac{1}{T}. \quad (8.2)$$

Тогда получаем

$$y_p = -\ln \cdot \ln \left(\frac{T}{T-1} \right). \quad (8.3)$$

Двойной показательный закон может быть представлен в виде трех предельных распределений экстремумов, отличающихся видом связи между приведенной переменной y_p и статистической переменной x .

⟨ Предельные распределения экстремумов используются для аппроксимации и экстраполяции эмпирических функций распределения. ⟩

Расчет экстремальных уровней начинается с построения эмпирических кривых обеспеченности. При их построении в качестве исходных данных используются отклонения экстремальных высот уровней от среднегодовых значений:

$$h_{\max} = H_{\max} - \bar{H},$$

$$h_{\min} = H_{\min} - \bar{H}. \quad (8.4)$$

При этом составляется таблица (табл. 8.1), в которой экстремальные высоты уровня располагаются в порядке убывания с номе-

Таблица 8.1. Фрагмент таблицы экстремальных высот уровня

m	y_p	$1-P$	$h_{\max}^1$	$h_{\max}^2$	$h_{\max}^3$	h_p^1	h_p^2	h_p^3	k_p^1	k_p^2	k_p^3	k_p^3

ром m (где $m = 1, 2, \dots, N$). Порядковый номер m в свою очередь связан с вероятностью превышения $(1-P)$ соотношением

$$1-P = \frac{m}{N+1}. \quad (8.5)$$

Эмпирические кривые обеспеченности экстремальных уровней наносятся на график. По оси ординат откладываются приведенные переменные y_p и соответствующие им вероятности превышения (обеспеченности) $1-P$. По оси абсцисс — безразмерные значения отклонений экстремальных годовых высот уровня h_p , отнесенные к среднегодовому максимуму $h_{2.33}$ ($h_{\max}/h_{2.33} = h_p$), соответствующему математическому ожиданию приведенной переменной $y_p = 0.578$ ($P_y = 0.57$, $T_y = 2.33$ года).

Ряд экстремальных высот уровня, используемый для экстраполяции значений в область редких повторяемостей, представляет собой случайную выборку из генеральной совокупности, что исключает возможность надежного определения теоретической функции распределения и, как следствие, предопределяет недостоверность экстраполированных значений экстремальных уровней. Нерепрезентативность рядов экстремальных уровней проявляется в том, что эмпирические кривые обеспеченности, построенные для сходных по своим условиям пунктов побережья определенного морского бассейна или его частей, значительно отличаются друг от друга. Особенно

большие различия имеют место в области малых вероятностей превышения, которые сохраняются и после исключения тренда и нормировки максимумов относительно их среднего значения для каждого пункта. >

Для учета нерепрезентативности (выборочной изменчивости) рядов экстремальных уровней определяется региональная функция распределения k_p , представляющая собой осреднение равновероятных значений безразмерных однородных функций распределения, полученных для нескольких пунктов наблюдений. Региональная функция распределения является режимной характеристикой, отражающей особенности распределения экстремальных уровней в исследуемом районе.

При определении региональной функции распределения экстремальных уровней ряды наблюдений приводятся к опорному периоду, в качестве которого выбирается обычно наибольший период наблюдений в одном из пунктов. Пропуски наблюдений в отдельные годы по всем рассматриваемым пунктам восстанавливаются по графикам связи экстремальных годовых отклонений. Для построения эмпирических региональных функций распределения используются не все выборки, а только те, которые в статистическом смысле являются однородными.

Однородные выборки отбираются с помощью критерия однородности σ_y , в основу которого положено выражение для стандартной ошибки приведенной переменной y_p :

$$\sigma_y = \frac{\exp(y_p)}{\sqrt{N(T-1)}}. \quad (8.6)$$

Критерий однородности рекомендуется применять для периода 10 лет. Величина y_p для этого периода определяется с учетом формулы (8.3). В практической деятельности за малую вероятность обычно принимают 5%-ный уровень значимости, при котором отклонения с обеспеченностью 0.95 не выходят за пределы $2\sigma_y$.

Если ряды годовых экстремумов приводятся к одному опорному периоду, то при расчете σ_y N приобретает смысл эффективной длины выборки $N_{эф}$, определяемой по формуле:

$$N_{эф} = N_n + N_b \quad (8.7)$$

или

$$N_{\text{эф}} = N_{\text{н}}, \quad (8.8)$$

где $N_{\text{н}}$ – число наблюдаемых экстремумов за опорный период; $N_{\text{в}}$ – число восстановленных экстремумов за тот же период.

Для определения однородных выборок рассчитывается среднее значение для всех пунктов k_p^{10} , соответствующее периоду $T = 10$ лет. Затем по графикам или таблицам индивидуальных кривых обеспеченности определяется значение y_p , соответствующее среднему значению $\bar{k}_p^{10}$, и далее отбираются выборки, входящие в доверительный интервал, определенный для каждого пункта. Для однородных пунктов осредняются равновероятные k_p^i . По значениям осредненных однородных выборок строится эмпирическая региональная кривая обеспеченности. Последняя аппроксимируется теоретической кривой обеспеченности, экстраполяция которой является основным способом определения уровней редкой повторяемости.

Основанием для выбора типа теоретического (предельного) распределения является кривизна эмпирической региональной кривой обеспеченности на графике двойного показательного закона. Для первого предельного распределения (используемого в данной работе) связь между приведенной переменной y_p и статистической переменной h выражается в виде прямой линии, для второго – в виде кривой с выпуклостью в сторону оси абсцисс, а для третьего – с вогнутостью в сторону оси абсцисс (рис. 8.1).

Теоретическая региональная функция распределения рассчитывается с помощью параметров соответствующего предельного распределения по ординатам эмпирической региональной функции распределения. При первом предельном распределении максимумы и минимумы теоретической региональной функции распределения заданной вероятности превышения могут быть рассчитаны на

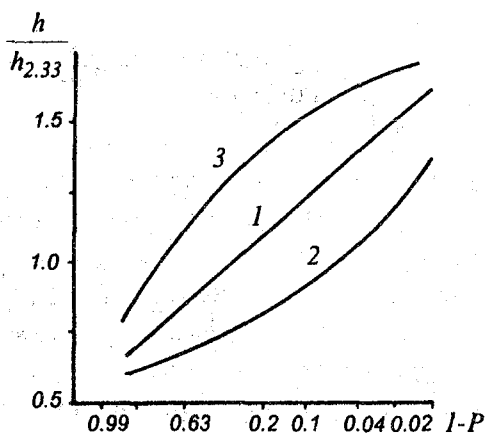


Рис. 8.1. Виды предельных распределений (1, 2, 3) приведенной переменной.

ОСНОВЕ СООТНОШЕНИЙ СООТВЕТСТВЕННО:

$$k_{\max}^T = u + \frac{y_p}{\alpha},$$

$$k_{\min}^T = u - \frac{y_p}{\alpha}, \quad (8.9)$$

где $\alpha = \sigma_N / \sigma_k$; $u = \bar{k}_p^3 - (\bar{Y}_N / \alpha)$; $\bar{Y}_N$ и σ_N – соответственно среднее значение и среднее квадратическое отклонение приведенной переменной y_p для выборок различных объемов (определяются по таблице (табл. 8.2), в которой N – длина ряда экстремумов); $\bar{k}_p^3$ – среднее значение исследуемого ряда:

$$\bar{k}_p^3 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N k_{p,i}^3; \quad (8.10)$$

$k_{p,i}^3$ – члены ряда, расположенные в порядке убывания; m – порядковый номер членов ряда; σ_k – среднее квадратическое отклонение экстремумов, которое определяется по формуле:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (k_{p,i}^3 - \bar{k}_p^3)^2}. \quad (8.11)$$

Таблица 8.2. Значения параметров $\bar{Y}_N$ и σ_N

N	20	30	40	50	60
$\bar{Y}_N$	0.524	0.536	0.544	0.548	0.552
σ_N	1.063	1.112	1.141	1.160	1.175

Параметры функции распределения (k_p^3 , σ_k , обеспеченность и т.д.) оцениваются с помощью статистик, которые при исследовании экстремумов, как правило, определяются по коротким выборкам. Поэтому каждый из рассчитанных экстремумов заданной вероятности превышения не является точным, а может принимать значения в пределах определенной доверительной области, ограниченной верхней и нижней доверительными границами:

$$k_{p(\text{вер})}^T = k_p^T + \sigma(k_p^T),$$

$$k_{p(\text{нижн})}^T = k_p^T - \sigma(k_p^T), \quad (8.12)$$

где $\sigma(k_p^T)$ – доверительные интервалы функции распределения, рассчитываемые по формуле

$$\sigma(k_p^T) = \sqrt{\frac{1 + 1.14 \left[(y_p - \bar{Y}_N) / \sigma_N \right] + 1.1 \left[(y_p - \bar{Y}_N) / \sigma_N \right]^2}{N}} \cdot \sigma_k. \quad (8.13)$$

Теоретическая региональная функция распределения позволяет рассчитать максимальные годовые отклонения уровня h_p заданной вероятности превышения для различных пунктов в соответствии с соотношением

$$h_p = h_{2.33} k_{\max, p}^T, \quad (8.14)$$

где $k_{\max, p}$ – ордината теоретической региональной функции распределения.

Максимальные и минимальные высоты уровня определяются соответственно по формулам:

$$\begin{aligned} H_{p(\max)} &= h_p \pm \sigma(\bar{h}_p) + H_m \pm \sigma_m, \\ H_{p(\min)} &= -h_p \pm \sigma(\bar{h}_p) + H_m \pm \sigma_m, \end{aligned} \quad (8.15)$$

или

$$\begin{aligned} H_{p(\max)} &= h_p \pm \sigma(\bar{h}_p) + H_{\max}, \\ H_{p(\min)} &= -h_p \pm \sigma(\bar{h}_p) + H_{\min}, \end{aligned} \quad (8.16)$$

где H_m – средний многолетний уровень; σ_m – среднеквадратическое отклонение среднегодовых значений уровня; $H_{\max}$ и $H_{\min}$ – соответственно наибольшее и наименьшее значения средних высот уровней, имевшие место в ряду наблюдений.

Исходные данные

1. Ряды максимальных отклонений уровня моря в грех близлежащих пунктах побережья.
2. Наибольшие значения из средних годовых высот уровня.

Порядок выполнения работ

1. Составляется таблица (см. табл. 8.1) максимальных годовых отклонений уровня моря $h_{\max, i}$.

В таблицу вписываются также и восстановленные значения уровня, определенные по графикам связи.

2. Составляется таблица (см. табл. 8.1) ординат индивидуальных кривых обеспеченности $h_{p,i}$.

Ряды значений $h_{p,i}$ располагают в порядке убывания. Для расчета $(1-P)$ и u_p используются формулы (8.2), (8.3) и (8.5).

Для каждого из пунктов определяются средние годовые максимумы $h_{2.33,i}$, соответствующие значению $1-P=0.43$ или $u_p=0.578$ и на эти величины производится нормирование значений $h_{p,i}$.

Нормированные значения региональной функции распределения $k_{p,i}$ ($k_{p,i}=h_{p,i}/h_{2.33}$) записываются в таблицу (табл. 8.1).

3. Строятся графики индивидуальных безразмерных кривых обеспеченности, с которых снимаются значения $k_{p,i}^{10}$ для каждого пункта, соответствующие периоду повторяемости 10 лет.

Значения $k_{p,i}^{10}$ можно также определить, пользуясь табл. 8.1, по величинам u_p или $1-P$, определенным для $T=10$ по формулам (8.2) и (8.3).

Определить u_p^{10} и среднее значение $\bar{k}_p^{10}$.

4. Выполнить отбор однородных рядов максимумов.

По формуле (8.7) определяется эффективная длина выборки $N_{эф,i}$ для рядов, в которых имеются пропуски наблюдений или формула (8.8), если пропусков в наблюдениях нет, и, используя формулу (8.6), рассчитываются критерии однородности $\sigma_{y,i}$.

Если ряды приведены к опорным периодам, то величина N в (8.6) приобретает смысл $N_{эф}$. Критерий однородности каждого ряда определяется для периода повторяемости 10 лет с соответствующим значением u_p^{10} , рассчитанным для $T=10$ лет.

Для каждого пункта определяются значения $u_{p,i}$, соответствующие значению $\bar{k}_p^{10}$ (осредненные величины $k_{p,i}^{10}$), и по величине $u_{p,i}$ определяется, какие выборки входят в доверительный интервал $u_p^{10}/2\sigma_{y,i}$, соответствующий доверительной вероятности $P=0.95$.

5. Рассчитать эмпирическую региональную функцию распределения k_p^3 .

Для выборок, входящих в доверительные интервалы, т.е. для однородных рядов, осредняются безразмерные значения $k_{p,i}$, соответствующие одинаковым вероятностям превышения $1-P$. Полученные значения k_p^3 записываются в таблицу (табл. 8.1) и наносятся на график.

6. Найти зависимость между теоретической и эмпирической региональными функциями распределения.

Для аппроксимации и экстраполяции используется соответствующее предельное распределение максимумов (в данном случае первое предельное распределение) (формулы (8.9), (8.10) и табл. 8.2), т.е. определяют-ся величины α , σ_k , σ_N , u , Y_N и $\bar{k}_p^3$.

Определяется теоретическая функция распределения $k_{\max, p}^T$ по рассчитанным значениям приведенной переменной u_p для $T=100$ и 1000 лет по формулам (8.3) и (8.8).

7. Определить доверительные интервалы экстремальных высот уровня.

Доверительные интервалы $\sigma(k_{100}^T)$ и $\sigma(k_{1000}^T)$ определяются для первого предельного распределения по выражению (8.12) по соответствующим значениям периода ($T=100$ и 1000 лет), т.е. по величинам u_p^{100} и u_p^{1000} .

8. Рассчитать максимальные уровни 1%-ной и 0.1%-ной обеспеченности.

Максимальные годовые отклонения уровня $h_{p,i}$ определяются по формуле (8.13) по средним годовым максимумам каждого однородного ряда $h_{2.33,i}$ и максимумам теоретической региональной функции распределения, рассчитанным для $T=100$ и 1000 лет. Максимальные высоты уровня определяются по формуле (8.15).

Для расчета величин $\sigma(h_{100})$ и $\sigma(h_{1000})$ необходимо значения $\sigma(k_{100})$ и $\sigma(k_{1000})$ умножить на величину $h_{2.33,i}$ каждого пункта наблюдений.

9. Анализ результатов.

Пример выполнения работы

В а р и а н т 31

k_p^{10} для $T=10$ лет : 1.1985 1.2645 1.1769 $\bar{k}_p^{10} = 1.2133$

u_p^{10} для $T=10$ лет : 2.2504

$h_{2.33} = 83.8$ 73.4 89.4

Критерии однородности $\sigma_{y,i}$ 0.4615 0.4615 0.4615

Доверительные интервалы 1 ряд : 1.3274 3.1733

2 ряд : 1.3274 3.1733

3 ряд : 1.3274 3.1733

Значения $y_{p,i}$ при $\bar{k}_p^{10}$					2.3998	1.5154	2.6250				
Однородность выборок					да	да	да				
m	h_p^1	h_p^2	h_p^3	$(1-P)$	T	y_p	k_p^1	k_p^2	k_p^3	k_p^3	
1	106.0	115.0	121.0	0.021	48.000	3.861	1.265	1.567	1.354	1.395	
2	105.0	107.0	110.0	0.042	24.000	3.157	1.253	1.458	1.231	1.314	
3	103.0	98.0	110.0	0.063	16.000	2.740	1.230	1.335	1.231	1.265	
4	102.0	96.0	106.0	0.083	12.000	2.442	1.218	1.308	1.186	1.237	
5	100.0	92.0	105.0	0.104	9.600	2.207	1.194	1.254	1.175	1.207	
6	100.0	92.0	105.0	0.125	8.000	2.013	1.194	1.254	1.175	1.207	
7	98.0	92.0	103.0	0.146	6.857	1.848	1.170	1.254	1.152	1.192	
8	97.0	90.0	100.0	0.167	6.000	1.702	1.158	1.226	1.119	1.168	
9	97.0	90.0	99.0	0.188	5.333	1.572	1.158	1.226	1.108	1.164	
10	93.0	88.0	99.0	0.208	4.800	1.454	1.110	1.199	1.108	1.139	
11	91.0	87.0	99.0	0.229	4.364	1.346	1.086	1.186	1.108	1.126	
12	91.0	85.0	98.0	0.250	4.000	1.246	1.086	1.158	1.096	1.114	
13	91.0	84.0	97.0	0.271	3.692	1.152	1.086	1.145	1.085	1.105	
14	90.0	83.0	97.0	0.292	3.429	1.065	1.074	1.131	1.085	1.097	
15	88.0	82.0	95.0	0.313	3.200	0.982	1.050	1.117	1.063	1.077	
16	87.0	79.0	94.0	0.333	3.000	0.903	1.039	1.076	1.052	1.056	
17	87.0	78.0	94.0	0.354	2.824	0.827	1.039	1.063	1.052	1.051	
18	86.0	78.0	90.0	0.375	2.667	0.755	1.027	1.063	1.007	1.032	
19	85.0	74.0	90.0	0.396	2.526	0.685	1.015	1.008	1.007	1.010	
20	85.0	74.0	90.0	0.417	2.400	0.618	1.015	1.008	1.007	1.010	
.....											
.....											
45	67.0	49.0	76.0	0.938	1.067	-1.020	0.800	0.668	0.850	0.773	
46	63.0	48.0	74.0	0.958	1.043	-1.156	0.752	0.654	0.828	0.745	
47	61.0	46.0	69.0	0.979	1.021	-1.354	0.728	0.627	0.772	0.709	

		$k_p^3 = 0.9954;$	$\sigma_k = 0.1584.$
Табл. 8.2:	$N = 47,$	$\bar{Y}_N = 0.5468;$	$\sigma_N = 1.1543.$
Параметры распределения		$\alpha = 7.2875;$	$u = 0.9204.$

T	y_p	k_p^{10}	$\sigma(k_p^{10})$	h_p^1	h_p^2	h_p^3	$\sigma(\bar{h}_p^1)$	$\sigma(\bar{h}_p^2)$	$\sigma(\bar{h}_p^3)$
100	4.6001	1.5516	0.0996	129.98	113.87	138.69	8.34	7.31	8.90
1000	6.9073	1.8682	0.1474	156.51	137.10	166.99	12.35	0.81	13.17

1%-ная обеспеченность	$H_1 = 1165.32$	$H_2 = 1149.17$	$H_3 = 1174.59$
0.1%-ная обеспеченность	$H_1 = 1195.85$	$H_2 = 1175.92$	$H_3 = 1207.16$

Литература

1. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и устьях рек при инженерных изысканиях. - М.: Гидрометеоиздат, 1973. - 535 с.

Работа № 9

Определение режима низкочастотных колебаний уровня в порту

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой определения режима низкочастотных колебаний уровня в порту.
2. Определить средние высоты и средние периоды низкочастотных колебаний уровня на подходах к порту.
3. Определить среднюю высоту низкочастотных резонансных колебаний уровня и резонансный период на акватории порта.
4. Определить степень защищенности морского порта от тягуна.

В некоторых портах явление низкочастотных колебаний пришвартованных к причалам судов с периодом, на порядок превышающим период ветровых волн (тягун), не редкое явление. Тягун наносит значительный экономический ущерб морским портам. При сильном тягуне происходят обрывы швартовых, повреждения судов и причалов, погрузочно-разгрузочные операции становятся невозможными, суда приходится выводить на внешний рейд.

Исследование явления тягуна связано с решением следующих задач [1]:

- необходимо объяснить физические причины возникновения тех волновых колебаний на подходах к порту, которые вызывают явление тягуна, и дать количественную оценку таких колебаний в зависимости от волнообразующих факторов;
- уметь рассчитывать реакцию гавани на воздействие таких волн;
- необходимо уметь предсказывать колебание пришвартованного судна под действием вынуждающей силы.

Считается, что причиной возникновения тягуна в порту являются низкочастотные волны, возникающие в штормовой зоне мо-

ря. Проникая в порт, они создают на его акватории систему сейш. Реакция портовой акватории в этом случае состоит в том, что из непрерывного спектра выбираются колебания с теми периодами, которые характерны для данной акватории. Натурные наблюдения свидетельствуют о том, что сильный тягун в порту возникает, как правило, при наличии сейшевых колебаний со средними высотами более 30 см и периодами, заключенными в интервале от 0.5 до 2.5 мин [1].

Поскольку тягун – природное явление и предотвратить его нельзя, а строить защитные сооружения нецелесообразно, поэтому при строительстве портовых сооружений необходимо учитывать возможность возникновения тягуна на акватории строящегося порта. В связи с этим на стадии проектирования следует особое внимание обращать на оградительные сооружения, располагая их так, чтобы они не допускали или сводили к минимуму возможность появления колебаний, вызывающих тягун. Метод определения степени защищенности морского порта от тягуна основывается на следующем: защищенность порта считается неудовлетворительной, если значительный тягун на его акватории наблюдается в среднем один раз в год и более.

Повторяемость и обеспеченность низкочастотных колебаний уровня в режимном плане принимаются равными повторяемости и обеспеченности ветровых волн.

Средние высота $\bar{h}_{нч}$ (м) и период $\bar{\tau}_{нч}$ (с) низкочастотных колебаний на подходах к порту в узкой прибрежной зоне с уклонами дна 0.01 и более на разгонах больше 100 км и при устойчивых продолжительных ветрах (более суток) со скоростью более 15 м/с определяются по формулам

$$\bar{h}_{нч} = 11(\bar{h}^2 / g\bar{\tau}^2), \quad (9.1)$$

$$\bar{\tau}_{нч} = 12\bar{\tau}. \quad (9.2)$$

Средний период $\bar{\tau}$ (с) и средняя высота $\bar{h}$ (м) ветровых волн определяются в этом случае в соответствии с требованиями СНиПа [2] либо по методике, изложенной в работе № 2. Средние высота и период волн $n\%$ -ной обеспеченности определяются с использованием таблиц вероятностей $P(k_d)$ для $\bar{h}$ и $P(k_d)$ для $\bar{\tau}$ (табл. 9.1, 9.2).

Элементы низкочастотных колебаний на подходах к порту в широкой прибрежной зоне с характерной глубиной H (м) и накло-

Таблица 9.1. Значения вероятностей $P(k_d)$ для $\bar{h}$, м

W м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	0.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.81	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0.87	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0.91	0.10	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0.92	0.36	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0.94	0.53	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.94	0.64	0.05	0	0	0	0	0	0	0
16	0.95	0.71	0.16	0	0	0	0	0	0	0
17	0.96	0.76	0.30	0	0	0	0	0	0	0
18	0.96	0.79	0.41	0.03	0	0	0	0	0	0
19	0.96	0.81	0.49	0.10	0	0	0	0	0	0
20	0.97	0.83	0.55	0.19	0	0	0	0	0	0
21	0.97	0.85	0.60	0.27	0.03	0	0	0	0	0
22	0.97	0.86	0.64	0.34	0.08	0	0	0	0	0
23	0.97	0.87	0.68	0.40	0.13	0.01	0	0	0	0
24	0.97	0.88	0.70	0.45	0.19	0.03	0	0	0	0
25	0.97	0.89	0.73	0.49	0.24	0.06	0	0	0	0
26	0.98	0.90	0.74	0.53	0.29	0.10	0.01	0	0	0
27	0.98	0.90	0.76	0.57	0.33	0.14	0.03	0	0	0
28	0.98	0.91	0.78	0.59	0.37	0.18	0.05	0.007	0	0
29	0.98	0.91	0.79	0.61	0.41	0.21	0.08	0.016	0	0
30	0.98	0.92	0.80	0.63	0.44	0.25	0.10	0.028	0.003	0
31	0.98	0.92	0.81	0.65	0.47	0.28	0.13	0.045	0.008	0
32	0.98	0.92	0.81	0.67	0.49	0.32	0.16	0.062	0.017	0.002
33	0.98	0.93	0.83	0.69	0.52	0.34	0.19	0.084	0.025	0.004
34	0.98	0.93	0.83	0.70	0.54	0.37	0.22	0.010	0.038	0.009
35	0.98	0.93	0.84	0.71	0.56	0.39	0.24	0.13	0.052	0.015
36	0.98	0.93	0.85	0.72	0.57	0.41	0.26	0.14	0.067	0.022
37	0.98	0.94	0.85	0.73	0.59	0.44	0.29	0.17	0.082	0.032
38	0.98	0.94	0.86	0.74	0.61	0.46	0.31	0.19	0.100	0.042
39	0.98	0.94	0.86	0.75	0.62	0.47	0.34	0.21	0.120	0.054
40	0.99	0.94	0.87	0.76	0.63	0.49	0.36	0.23	0.130	0.066

Таблица 9.2. Значения вероятностей $P(k_d)$ для $\bar{\tau}$, с

W м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8	0.99	0.96	0.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.99	0.97	0.88	0.43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.99	0.98	0.92	0.69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1.00	0.98	0.93	0.78	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1.00	0.98	0.94	0.83	0.54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1.00	0.98	0.95	0.86	0.64	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1.00	0.98	0.95	0.87	0.70	0.37	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1.00	0.98	0.95	0.89	0.74	0.47	0.11	0	0	0	0	0	0	0
16	1.00	0.98	0.96	0.89	0.77	0.55	0.22	0	0	0	0	0	0	0
17	1.00	0.99	0.96	0.90	0.79	0.60	0.32	0.05	0	0	0	0	0	0
18	1.00	0.99	0.96	0.91	0.81	0.64	0.39	0.12	0	0	0	0	0	0
19	1.00	0.99	0.96	0.91	0.82	0.67	0.45	0.19	0.022	0	0	0	0	0
20	1.00	0.99	0.96	0.92	0.83	0.70	0.50	0.25	0.053	0	0	0	0	0
21	1.00	0.99	0.96	0.92	0.84	0.71	0.53	0.30	0.095	0	0	0	0	0
22	1.00	0.99	0.96	0.92	0.85	0.73	0.56	0.35	0.14	0.02	0	0	0	0
23	1.00	0.99	0.97	0.92	0.86	0.74	0.59	0.39	0.18	0.041	0	0	0	0
24	1.00	0.99	0.97	0.93	0.86	0.76	0.61	0.42	0.22	0.067	0.008	0	0	0
25	1.00	0.99	0.97	0.93	0.86	0.77	0.62	0.45	0.25	0.095	0.015	0	0	0
26	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.78	0.64	0.47	0.28	0.12	0.028	0	0	0
27	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.78	0.65	0.49	0.31	0.15	0.042	0.004	0	0
28	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.79	0.66	0.51	0.34	0.17	0.059	0.010	0	0
29	1.00	0.99	0.97	0.93	0.88	0.79	0.67	0.52	0.37	0.20	0.077	0.010	0	0
30	1.00	0.99	0.97	0.94	0.88	0.80	0.68	0.54	0.38	0.22	0.095	0.024	0.003	0
31	1.00	0.99	0.97	0.94	0.88	0.80	0.69	0.55	0.39	0.24	0.11	0.033	0.006	0
32	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.81	0.70	0.57	0.41	0.25	0.13	0.044	0.008	0
33	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.81	0.70	0.58	0.43	0.27	0.14	0.055	0.013	0.001
34	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.82	0.71	0.58	0.44	0.29	0.16	0.066	0.018	0.003
35	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.82	0.72	0.60	0.45	0.30	0.17	0.077	0.023	0.004
36	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.82	0.72	0.60	0.46	0.32	0.19	0.087	0.029	0.006
37	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.82	0.73	0.61	0.47	0.33	0.20	0.098	0.036	0.008
38	1.00	0.99	0.97	0.94	0.89	0.83	0.73	0.61	0.48	0.34	0.21	0.11	0.042	0.012
39	1.00	0.99	0.97	0.94	0.90	0.83	0.74	0.62	0.49	0.35	0.22	0.12	0.049	0.014
40	1.00	0.99	0.97	0.94	0.90	0.83	0.74	0.62	0.50	0.36	0.23	0.13	0.056	0.017

ном дна менее 0.01 определяются с использованием графика (рис. 9.1) по формуле

$$\bar{h}_{\text{нч}} = 11 \frac{\bar{h}^2}{g \bar{\tau}^2} f\left(\frac{H}{g \bar{\tau}^2}\right), \quad (9.3)$$

где $f(H/g\bar{\tau}^2)$ – функция, определяемая по графику (рис. 9.1).

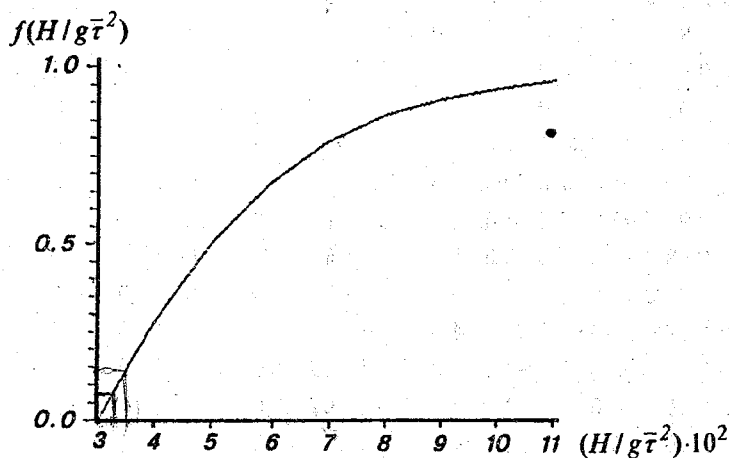


Рис. 9.1. График для определения величины $f(H/g\bar{\tau}^2)$.

Средняя высота низкочастотных колебаний на акватории порта рассчитывается по формуле

$$\bar{h}_c = \bar{h}_{\text{нч}} R_H, \quad (9.4)$$

где R_H – коэффициент усиления нерегулярных низкочастотных колебаний, определяемый по графику (рис. 9.2) в зависимости от резо-

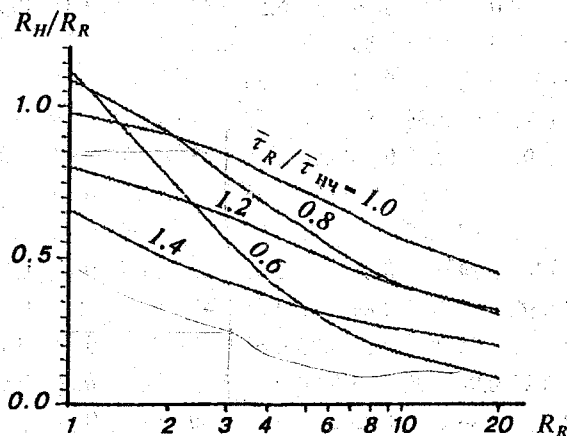


Рис. 9.2. График для определения коэффициента усиления R_H .

нансного коэффициента усиления R_R и отношения $\bar{\tau}_R / \bar{\tau}_{нч}$; $\bar{\tau}_R$ – резонансный период, равный:

$$\bar{\tau}_R = \frac{2\pi}{k_R \sqrt{gH}}, \quad (9.5)$$

k_R – резонансное волновое число. Коэффициенты k_R и R_R определяются с использованием графика (рис. 9.3) по известным геометрическим характеристикам морского порта: ширины входа в порт c (м), характерных ширины l (м) и длины $2d$ (м) акватории порта.

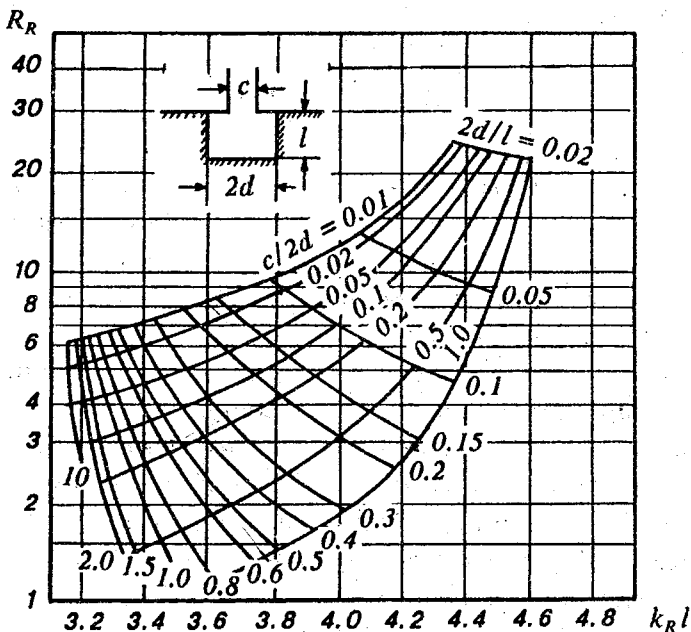


Рис. 9.3. График для определения величин R_R и k_R .

Исходные данные

1. По району морского порта повторяемость градаций скорости ветра для наиболее волноопасного направления и для месяца с наиболее сильными ветрами (повторяемость ветра можно использовать по исходным данным работы № 1).

2. Размеры портовой акватории и ширина входа в порт ($l = 1200$ м, $2d = 700$ м и $c = 120$ м).

3. Средняя глубина в прибрежной зоне H (м) и уклон дна (определяются по карте района).

Порядок выполнения работы

1. Определить среднюю высоту $\bar{h}$ (м) и средний период $\bar{\tau}$ (с) ветровых волн волноопасного направления с заданной обеспеченностью (4%-ной обеспеченностью) по данным о повторяемости ветра в районе порта.

Высота и период волн заданной обеспеченности определяется с использованием таблиц (табл. 9.1 и 9.2) ($P(k_d)$ для $\bar{h}$ и $P(k_d)$ для $\bar{\tau}$) по скоростям ветра, равным верхним градациям, т.е. 1, 5, 9, ..., 39, 40 м/с, предварительно определив повторяемость градаций скорости ветра по волноопасному направлению по формуле

$$F = \frac{p \cdot 100}{\Sigma p} [\%].$$

По рассчитанному для всех градаций ветра значению F с использованием табл. 9.1 для $\bar{h}$ и табл. 9.2 для $\bar{\tau}$ определяется произведение величин ($F_i P_j$) для всех значений высот и периодов волны (i – изменение вероятностей F по градациям скорости ветра, j – изменение ($P(k_d)$ по скорости ветра верхней градации).

2. Определить средние высоту $\bar{h}_{нч}$ (м) и период $\bar{\tau}_{нч}$ (с) низкочастотных колебаний уровня на подходах к порту.

Средняя высота низкочастотных колебаний определяется в зависимости от наклона дна по формулам (9.1) или (9.3) с использованием графика (рис. 9.1), а средний период – по формуле (9.2).

3. Определить средние высоту $\bar{h}_c$ (м) и период $\bar{\tau}_c$ (с) низкочастотных колебаний на акватории порта.

По известным геометрическим характеристикам порта по графику (рис. 9.3) определяются значения резонансного коэффициента усиления R_R и резонансного волнового числа k_R . Средняя высота низкочастотных колебаний на акватории порта рассчитывается по формуле (9.4) с использованием коэффициента усиления нерегулярных низкочастотных колебаний R_H , определяемого по графику (рис. 9.2). Резонансный период колебаний на акватории порта принимается равным периоду низкочастотных колебаний ($\bar{\tau}_R = \bar{\tau}_c$), рассчитанному по формуле (9.5).

4. Анализ результатов.

В анализе результатов указать степень защищенности порта от тягуна.

Пример выполнения работы

В а р и а н т - 31

Исходные данные

Ширина акватории $l = 1200$ м

Длина акватории $2d = 700$ м

Ширина входа в порт $c = 120$ м

Наклон дна ≤ 0.01

Характерная глубина прибрежной зоны $H = 33.0$ м

W см/с	1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	21-24	25-28	29-34	35-39
$P \%$	1.00	3.90	6.40	5.70	4.20	2.60	0.70	0.50	0.50	0.27
$F \%$	3.88	15.13	24.84	22.12	16.30	10.09	2.72	1.94	1.94	1.04
h м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Sigma(F \cdot P)$	68.40	35.67	16.36	6.43	2.93	1.64	0.88	0.25	0.20	0.07
τ с	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Sigma(F \cdot P)$	80.7	79.5	75.6	60.8	42.1	27.3	15.4	7.2	3.2	1.4

Средняя высота волн (4%-ной обеспеченности) $\bar{h} = 4.69$ м

Средний период волн (4%-ной обеспеченности) $\bar{\tau} = 9.79$ с

$$(H/g\bar{\tau}) = 3.51,$$

$$f(H/g\bar{\tau}) = 0.14$$

Средняя высота низкочастотных колебаний $\bar{h}_{нч} = 0.04$ м

Средний период низкочастотных колебаний $\bar{\tau}_{нч} = \bar{\tau}_c = 117.53$ с

$$c/2d = 0.17, \quad 2d/l = 0.58.$$

Коэффициент $R_R = 3.05$, $k_R l = 3.42$, Коэффициент $k_R = 0.0028$,

$$\bar{\tau}_R / \bar{\tau}_{нч} = 1.04,$$

$$R_H / R_R = 0.79,$$

$$R_H = 2.42.$$

Средняя высота низкочастотных колебаний на акватории порта

$$\bar{h}_c = 0.088 \text{ м}$$

Порт от тягуна защищен

Литература

1. Ветер, волны и морские порты / Под ред. Ю.М. Крылова. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 264 с.

Работа № 10

Расчет нагрузок от льда на гидротехнические сооружения

Задачи работы

1. Ознакомиться с методами расчета ледовых нагрузок, возникающих при взаимодействии гидротехнических сооружений со льдом.
2. Рассчитать и выполнить анализ ледовых нагрузок на сооружение вертикального профиля и отдельно стоящую опору при их различном взаимодействии с ледяными полями.

Для гидротехнических сооружений, возводимых на шельфе замерзающих морей, важными являются нагрузки, возникающие при взаимодействии сооружений с ледяными полями. При строительстве гидротехнических сооружений в арктических районах, где возможно наличие мощного ледяного покрова, необходимо проектирование таких конструкций сооружений, которые отвечали бы тяжелым ледовым условиям этих районов, т.е. были бы способны воспринимать значительные горизонтальные (в некоторых случаях и вертикальные) нагрузки. Один из самых распространенных типов ледостойких сооружений — опоры стационарных платформ, предназначенных для эксплуатационного бурения. Конструктивной особенностью морских ледостойких опор является их круговая симметрия в плане, поскольку движение ледяных полей в море может наблюдаться по всем направлениям. Экономичность и надежность этих сооружений в значительной степени зависят от достоверности определения нагрузок, возникающих при различном взаимодействии сооружений со льдом.

Нагрузки при взаимодействии льда с гидротехническими сооружениями возникают при движении ледяных полей и отдельных льдин, от воздействия наваливающегося на сооружение ледяного поля, при ударе и разрушении льда, его остановке сооружением, при

изменении уровня моря в случае примерзшего к сооружению льда, при температурном расширении сплошного ледяного покрова и в некоторых других случаях в зависимости от типа и конструкции сооружения.

Разнообразный характер условий эксплуатации гидротехнических сооружений позволяет выделить динамический и статический режимы взаимодействия с ними льда. В зависимости от режима взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями следует применять различные значения физико-механических характеристик, определяющих прочность льда как материала. При этом рассчитываются прочность льда на изгиб, сжатие и местное раздробление в зависимости от схемы взаимодействия. При расчете нагрузок на сооружения типа вертикальной стенки от навала ледяных полей, при изменении уровня воды и т.п. рассматривается статический режим. Ледостойкие морские опоры сооружений, которые эксплуатируются до глубин 30 м, имеют большую изгибную жесткость, поэтому ледовое воздействие, соответствующее экстремальному значению нагрузки, можно считать квазистатическим, также же как и при взаимодействии ледяного поля с опорой при их смерзании в случае изменения уровня воды. В связи с этим при расчете нагрузок на сооружения типа вертикальной стенки и жестких ледостойких опор используются характеристики льда для статического режима взаимодействия.

Для определения ледовых нагрузок необходимо располагать следующими статистическими данными о характере ледового режима [1]:

- скорость движения ледяного поля;
- толщина ледяного поля;
- площадь ледяного поля;
- толщина зазора;
- толщина слоя снега на льду;
- соленость воды и льда.

Нагрузки от льда на сооружения определяются для периода времени с наибольшими динамическими воздействиями при расчетной толщине льда не более 1.5 м. Точка приложения равнодействующей ледовой нагрузки принимается ниже расчетного уровня воды на 0.3 расчетной толщины льда.

Значения нагрузок на сооружения от движущегося торосистого ледяного поля увеличиваются при расчетах для Берингова, Охотского, Белого морей и морей Арктического бассейна в 1.5 раза, для остальных морей – в 1.3 раза.

Ледовые нагрузки F (МН) на секцию сооружения с вертикальной передней гранью рассчитываются по следующим формулам [1,2]:

а) горизонтальная нагрузка при ударе отдельных льдин

$$F_1 = 0.07 v_{\text{л}} h_{\text{л}} \sqrt{\Omega R_c} ; \quad (10.1)$$

б) горизонтальная нагрузка при разрушении льда

$$F_2 = 0.5 R_c h_{\text{л}} l ; \quad (10.2)$$

в) горизонтальная нагрузка от воздействия наваливающегося на сооружение ледяного поля под действием ветра и течения

$$F_3 = (5 \cdot 10^{-6} u_{\text{max}}^2 + 5 \cdot 10^{-4} \frac{h_{\text{л}} u_{\text{max}}}{L} + 9.2 \cdot 10^{-3} h_{\text{л}} i + 2 \cdot 10^{-8} W_{\text{max}}^2) \Omega ; \quad (10.3)$$

г) вертикальная нагрузка от примерзшего ледяного покрова при изменении уровня воды

$$F_4 = 0.2 \cdot l \xi_d \tau_d \sqrt{h_{\text{л}}^3 / \Phi} ; \quad (10.4)$$

$$\Phi = 1 + \frac{3 \cdot 10^2}{\mu_{\text{л}}} \left\{ \tau_d + 50 [1 - \exp(-0.4 \tau_d)] \right\} , \quad (10.5)$$

где $h_{\text{л}}$ – максимальная толщина льда 1%-ной обеспеченности, м; $v_{\text{л}}$ – скорость движения ледяного поля, м/с; Ω – площадь ледяного поля, м²; R_c – нормативное сопротивление льда сжатию, МПа, (табл. 10.1); l – ширина секции сооружения по фронту на уровне действия льда, м; u_{max} – максимальная скорость течения подо льдом 1%-ной обеспеченности в период ледохода, м/с; L – средняя длина ледяного поля по направлению потока, м; i – уклон поверхности потока; W_{max} – максимальная скорость ветра 1%-ной обеспеченности в период ледохода, м/с; ξ_d – скорость понижения или повышения уровня воды, м/ч; τ_d – время (ч), в течение которого происходит деформация ледяного поля при понижении или повышении уровня воды (принимается не более, чем время, в течение которого уровень воды изменится на величину, равную толщине льда); Φ – безразмер-

ная функция времени; $\mu_{\text{л}}$ – коэффициент вязкости льда, МПа·ч, формула для определения которого приведена ниже.

При определении солёности льда принимается, что ее значение равно 20 % от солёности воды для льда возрастом до двух месяцев или 15 % от солёности воды – для льда возрастом более двух месяцев.

Таблица 10.1. Значения нормативного сопротивления льда сжатию R_c

Солёность льда, ‰	Среднесуточная температура воздуха, °С			
	0	-3	-15	-30
<1 (пресный лед)	0.45	0.75	1.20	1.50
1 - 2	0.40	0.65	1.05	1.35
3 - 6	0.30	0.50	0.85	1.05

Ледовые нагрузки F (МН), возникающие при взаимодействии ледяных полей с отдельно стоящими опорами, рассчитываются по следующим формулам [1,2]:

а) горизонтальная нагрузка при прорезании льда огорой

$$F_5 = m R_b b h_{\text{л}}, \quad (10.6)$$

б) горизонтальная нагрузка при остановке ледяного поля опорой

$$F_6 = 0.04 v_{\text{л}} h_{\text{л}} \sqrt{m \Omega R_b \operatorname{tg} \delta}; \quad (10.7)$$

в) вертикальная нагрузка на опору от примерзшего ледяного покрова при изменении уровня воды

$$F_7 = k_f R_f h_{\text{л}}^2, \quad (10.8)$$

где m – коэффициент формы опоры в плане (табл. 10.2); b – ширина

Таблица 10.2. Значения коэффициента m

Коэф- фициент	Коэффициент m для опор с передней гранью в виде							
	много- гранника	прямо- угольника	треугольника с углом заострения $2\delta^\circ$ в плане					
			45	60	75	90	120	150
m	0.90	1.00	0.54	0.59	0.64	0.69	0.77	1.00

(диаметр) опоры сооружения, м; R_b – нормативное сопротивление льда смятию, МПа, равное

$$R_b = k_b R_c, \quad (10.9)$$

δ – половина угла заострения передней грани опоры; k_f – безразмерный коэффициент (табл. 10.3), принимаемый по отношению $D/h_{\text{л}}$; D – диаметр опоры (при прямоугольной форме опоры в плане со сторонами a и b (м) ее диаметр принимается равным $D = 1.1 \sqrt{ab}$, а для опоры в форме многогранника и треугольника $D = b$); k_b – коэффициент (табл. 10.4), определяемый по значению $b/h_{\text{л}}$; R_f – нормативное сопротивление льда изгибу (МПа), равное

$$R_f = 0.5 R_c. \quad (10.10)$$

В инженерных расчетах при обосновании строительства ледостойких сооружений, согласно [2], нагрузки от воздействия движущихся ледяных полей на протяженные сооружения с вертикальной

Таблица 10.3. Значения коэффициента k_f

$D/h_{\text{л}}$	0.1	0.2	0.5	1	2	3	5	10	20
k_f	0.16	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.43	0.63	1.11

Таблица 10.4. Значения коэффициента k_b

$b/h_{\text{л}}$	1	3	10	20	30	≤ 50
k_b	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0	0.5

передней гранью при ударе отдельных льдин или при разрушении льда и на отдельно стоящую опору при прорезании ею льда или при остановке ледяного поля опорой принимаются по наименьшим из рассчитанных значений соответственно по формулам (10.1), (10.2) и (10.8), (10.9).

Линейная нагрузка q (кН/м) на сооружение от сплошного ледяного покрова при его температурном расширении определяется по формуле [2]

$$q = h_{\text{л}} k_l P_t, \quad (10.11)$$

где k_l – коэффициент (табл. 10.5), определяемый в зависимости от

Таблица 10.5. Значения коэффициента k_l

$L, \text{м}$	≥ 50	70	90	120	≤ 150
k_l	1	0.9	0.8	0.7	0.6

протяженности ледяного покрова L (длины ледяного поля по потоку); P_t – давление за счет упругой деформации при температурном расширении льда (МПа), которое определяется следующим образом:

а) при расчете линейной нагрузки для льда соленостью менее 2 ‰

$$P_t = 0.05 + 11 \cdot 10^{-5} \left[\frac{dT}{dt} \right]_{\max} \mu_{\text{л}} \varphi; \quad (10.12)$$

б) при расчете линейной нагрузки для льда соленостью ≥ 2 ‰

$$P_t = 0.1, \quad (10.13)$$

$(dT/dt)_{\max}$ – максимальная скорость повышения температуры воздуха за время t ; φ – безразмерный коэффициент, определяемый по графику (рис. 10.1); $\mu_{\text{л}}$ – коэффициент вязкости льда (МПа·ч), определяемый по следующим формулам:

а) при температуре льда $T_{\text{л}} \geq -20$ °С

$$\mu_{\text{л}} = (3.3 - 0.28T_{\text{л}} + 0.083T_{\text{л}}^2) \cdot 10^2, \quad (10.14)$$

б) при температуре льда $T_{\text{л}} < -20$ °С

$$\mu_{\text{л}} = (3.3 - 1.85T_{\text{л}}) \cdot 10^2. \quad (10.15)$$

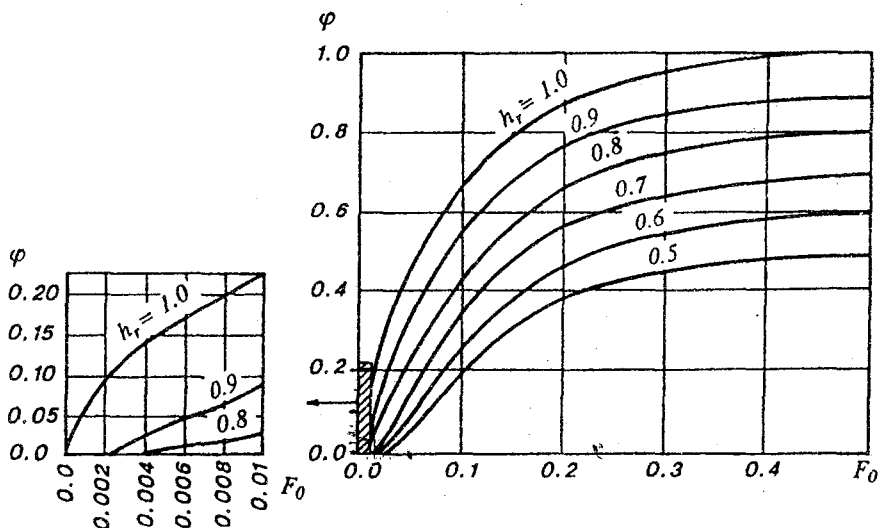


Рис. 10.1. Графики значений коэффициента φ .

Для определения температуры льда $T_{\text{л}}$ используется выражение

$$T_{\text{л}} = T_0 h_r + \frac{(dT/dt)|_{\text{max}} \cdot l}{2} \psi, \quad (10.16)$$

где T_0 – начальная температура воздуха, от которой она повышается, °C; ψ – безразмерный коэффициент, определяемый по графику (рис. 10.2); h_r – относительная толщина ледяного покрова с учетом влияния снега (м), определяемая по формуле

$$h_r = \frac{h_{\text{л}}}{h_{\text{red}}}; \quad (10.17)$$

h_{red} – приведенная толщина ледяного покрова (м), рассчитываемая по выражению

$$h_{\text{red}} = h_{\text{л}} + 1.43 h_{\text{с, min}} + \frac{2.3}{\alpha}; \quad (10.18)$$

$h_{\text{с, min}}$ – наименьшая толщина снежного покрова (м) за расчетный пе-

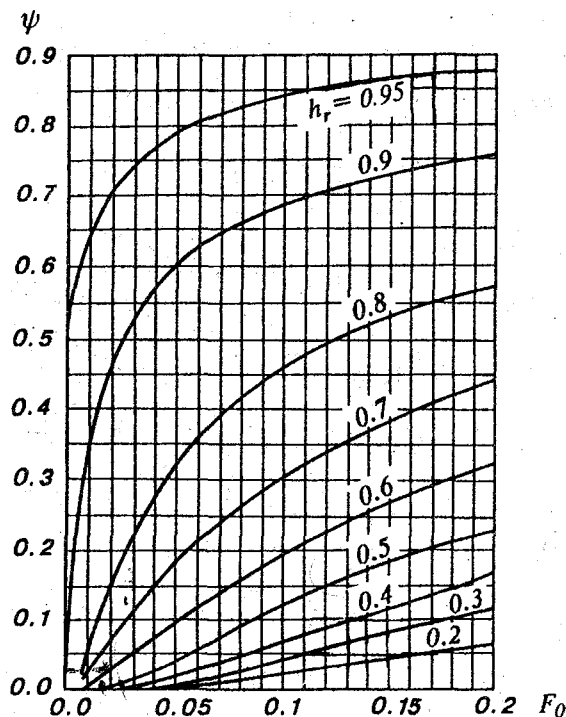


Рис. 10.2. Графики значений коэффициента ψ .

риод (определяется по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии принимается равной нулю); α – коэффициент теплоотдачи

от воздуха и поверхности снежного покрова (Вт/м^2) принимаемый равным:

а) при наличии снега

$$\alpha = 23\sqrt{W_m + 0.3}, \quad (10.19)$$

б) при отсутствии снега

$$\alpha = 6\sqrt{W_m + 0.3}, \quad (10.20)$$

W_m — средняя скорость ветра, м/с.

Для определения безразмерных коэффициентов в (10.12) и в (10.16), учитывающих толщину снежного покрова и его теплоотдачу, с использованием графиков (см. рис. 10.1, 10.2) требуется расчет относительной толщины ледяного покрова h_r и безразмерной величины F_0 , определяемой по выражению

$$F_0 = \frac{4 \cdot 10^{-3} t}{h_{red}^2}. \quad (10.21)$$

Расчетная ширина ледяного поля принимается по данным натурных наблюдений. Рассчитанные значения нагрузок, особенно для цилиндрических опор морских гидротехнических сооружений, в инженерной практике и согласно [2] уточняются по опытным данным.

Исходные данные

1. Среднесуточная температура воздуха за период, предшествующий воздействию льда на сооружение и температура воздуха T_0 с момента ее повышения (в данном случае выбирается из гидрометеорологического бюллетеня).

2. Максимальная толщина льда $h_{л}$, м.

3. Минимальная высота снежного покрова $h_{с, \min}$, м.

4. Соленость воды.

5. Максимальная $W_{\max}$ и средняя W_m скорость ветра в период ледохода.

6. Скорость движения ледяного поля $u_{л}$ и скорость течения $u_{\max}$ подо льдом.

7. Ширина секции сооружения l и ширина (диаметр) опоры b .

8. Скорость повышения или понижения уровня воды ξ_d .

9. Время деформации ледяного поля при изменении уровня τ_d .

10. Интервал времени между наблюдениями t , ч.

11. Размеры ледяного поля (длина и ширина).

Порядок выполнения работы

3 1. Определить нормативные сопротивления льда сжатию R_c , смятию R_b и изгибу R_f

Нормативное сопротивление льда сжатию (см. табл. 10.1) определяется по солёности льда, принимаемой равной 20 % от солёности воды, и среднесуточной температуре воздуха за трое суток, предшествующих расчету. Нормативное сопротивление льда изгибу рассчитывается по формуле (10.10). Нормативное сопротивление льда смятию (10.9) рассчитывается с использованием коэффициента k_b (см. табл. 10.4).

2 Определить горизонтальные нагрузки F (МН) на секцию протяженного сооружения при ударе отдельных льдин F_1 , при разрушении льда F_2 , от воздействия наваливающегося льда F_3 и вертикальную нагрузку от примерзшего льда F_4 при изменении уровня воды.

Нагрузки на секцию сооружения при ударе отдельных льдин рассчитываются по формуле (10.1), при разрушении льда – по формуле (10.2), от наваливающегося льда – по формуле (10.3). Уклон поверхности потока принимается равным нулю.

При расчете (вертикальной нагрузки от примерзшего к сооружению льда при изменении уровня воды) по формулам (10.4), (10.5) время τ_d деформации ледяного покрова принимается по данным натурных наблюдений (исходных данных), но не больше времени изменения уровня $\tau_d = h_d / \dot{\xi}_d$ на величину $(\tau_d \cdot \dot{\xi}_d)$, равную толщине льда.

Коэффициент вязкости льда $\mu_{\text{л}}$ рассчитывается по формулам (10.14) или (10.15) в зависимости от температуры поверхности льда $T_{\text{л}}$, определяемой по формуле (10.16) с использованием рассчитанных значений относительной h_r и приведенной h_{red} толщин ледяного покрова, безразмерного коэффициента ψ , принятого согласно графику (рис. 10.2) по h_r и величине F_0 , рассчитанной по формуле (10.21).

3. Определить горизонтальные нагрузки F (МН) на опору сооружения при прорезании опорой льда F_5 , при остановке опорой ледяного поля F_6 и вертикальную нагрузку от примерзшего ледяного покрова F_7 при изменении уровня воды.

Горизонтальные нагрузки, возникающие при прорезании опорой льда и при остановке ею ледяного поля, рассчитываются по формулам (10.6) и (10.7) соответственно. Коэффициент формы опоры в плане m определяется по табл. 10.2. Безразмерный коэффициент k_f принимается по

табл. 10.5 в зависимости от отношения D/h_d . Диаметр D опоры сооружения принимается равным ширине опоры (в исходных данных), если опора имеет форму многогранника и треугольника, и $D = 1.1b$, если форма опоры в плане прямоугольная.

4. Определить давление за счет упругой и пластической деформации P_1 при термическом расширении льда.

Величина P_1 определяется для льда соленостью менее 2 ‰ по формуле (10.12) с использованием рассчитанного ранее коэффициента вязкости льда μ_L , максимальной скорости изменения температуры воздуха с момента ее повышения и безразмерного коэффициента φ , определенного по графику (см. рис. 10.1) в зависимости от рассчитанных величин h_r и F_0 . Для льда соленостью более 2 ‰ значение P_1 принимается равным 0.1 МПа.

5. Определить линейную нагрузку на сооружение q (МН/м) от воздействия сплошного ледяного покрова при его температурном расширении.

Линейная нагрузка определяется по формуле (10.11). Коэффициент k_1 принимается по табл. 10.5 в зависимости от протяженности ледяного покрова.

6. Анализ результатов.

Выполнить анализ рассчитанных ледовых нагрузок на протяженное сооружение и отдельно стоящую опору, возникающих при различном взаимодействии льда с сооружениями.

Пример выполнения работы

В а р и а н т - 31

Исходные данные

Максимальная толщина льда	$h_{Л} = 0.76 \text{ м}$
Толщина снега	$h_{с, \min} = 0.15 \text{ м}$
Соленость воды	$S = 9.0 \text{ ‰}$
Среднесуточная температура воздуха	$T = -15.40 \text{ °C}$
Температура воздуха от повышения	$T_0 = -16.20 \text{ °C}$
Скорость повышения температуры воздуха	$(dT/dt) _{\max} = 0.05 \text{ °C/ч}$
Длина секции сооружения	$l = 30.0 \text{ м}$
Ширина (диаметр) опоры	$b = 5.0 \text{ м}$
Скорость движения ледяного поля	$v_{Л} = 0.15 \text{ м/с}$
Скорость течения воды подо льдом	$u_{\max} = 0.40 \text{ м/с}$

Максимальная скорость ветра	$W_{\max} = 25.00 \text{ м/с}$
Средняя скорость ветра	$W_m = 8.00 \text{ м/с}$
Скорость изменения уровня	$\xi_d = 0.066 \text{ м/ч}$
Время изменения уровня	$\tau_d = 8.0 \text{ ч}$
Интервал времени между наблюдениями	$t = 6 \text{ ч}$
Размеры поля (длина, ширина)	$\Omega = 455.0 \times 240.0 = 109200 \text{ м}^2$
Форма опоры - прямоугольник	

Соленость льда $S_{\text{л}} = 1.8 \text{ ‰}$

$R_c = 1.058 \text{ МПа,}$

$R_b = 1.846 \text{ МПа,}$

$R_f = 0.529 \text{ МПа,}$

$b/h_{\text{л}} = 6.579, \quad k_b = 1.744,$

$D/h_{\text{л}} = 7.237, \quad k_f = 0.519, \quad m = 1.00,$
 $\tau_d(\text{исх}) = 8.0, \quad \tau_d(\text{рас}) = 8.0, \quad \Phi = 9.829.$

Ледовые нагрузки на секцию сооружения

При ударе отдельных льдин $F_1 = 2.71242 \text{ МН}$

При разрушении льда $F_2 = 12.06120 \text{ МН}$

От наваливающегося льда $F_3 = 1.48002 \text{ МН}$

От примерзшего льда $F_4 = 1.45635 \text{ МН}$

Ледовые нагрузки на опоры сооружения

При прорезании льда опорами $F_5 = 7.01303 \text{ МН}$

При остановке ледяного поля $F_6 = 2.04709 \text{ МН}$

От примерзшего льда $F_7 = 0.15873 \text{ МН}$

$h_r = 0.753, \quad h_{\text{red}} = 1.009, \quad F_0 = 0.02356,$

$\varphi = 0.0813, \quad \psi = 0.1566, \quad T_{\text{л}} = -12.176,$

$k_l = 0.60, \quad \mu_{\text{л}} = 1901.19.$

Давление за счет упругой деформации

$P_t = 0.05085 \text{ МПа}$

Линейная нагрузка на сооружение

$q = 0.02319 \text{ МН/м}$

Литература

1. *Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов).* - Л.: Изд. ВНИИГ, 1976. - 316 с.
2. *Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).* СНиП 2.06.04-82. - М.: Госстрой СССР, 1989. - 40 с.

Работа № 11

Расчет грузоподъемности ледяного покрова

Задачи работы

1. Ознакомиться с одной из методик расчета грузоподъемности ледяного покрова.
2. Рассчитать грузоподъемность ледяного покрова по ледовой трассе.
3. Определить возможность использования ледовой трассы для грузовых перевозок и выбрать оптимальный вариант состава грузового поезда.

(Одной из основных целей исследования ледяного покрова является использование его грузоподъемности для выполнения на ледяном покрове различных грузовых и транспортных операций.) Грузоподъемностью ледяного покрова называется грузоподъемность при нагрузках, приводящих к образованию в нем трещин (вплоть до появления первых сквозных трещин), а предельной грузоподъемностью – полная несущая способность, превышение которой приводит к пролому льда. Сквозные трещины представляют опасность, хотя грузоподъемность ледяного покрова при их появлении еще далека от предельной [1].

(Грузоподъемность морского льда связана с его прочностными характеристиками.) На несущую способность ледяного покрова, т.е. его свойство длительное время противостоять разрушению под действием различных нагрузок, существенное влияние, кроме его прочностных характеристик, оказывает длительность времени приложения и характер приложенной нагрузки. (Обычно выделяются три характерных режима нагружения льда: динамический, при котором упругие свойства льда проявляются полностью; статический, когда силами инерции можно пренебречь, и режим длительного нагружения, при котором полностью проявляются вязкие свойства льда. Несущая способность ледяного поля при длительном нагружении оп-

ределяется двумя основными способами, состоящими в описании деформации ледяного поля как сплошной вязкоупругой плиты и оценка времени потери несущей способности ледяного покрова, на котором помещен груз.

(Методы расчета грузоподъемности подразделяются на три основные группы:

- основанные на эмпирических формулах;
- упрощенные, основанные на принципе аналогии;
- расчетные, базирующиеся на положениях теории упругости.)

Кроме методов, объединенных в эти группы, разработаны также методы расчета грузоподъемности ледяного покрова, основанные на решениях теории пластичности (теории предельного равновесия) и на представлении ледяного поля как упруго-хрупкой среды, состоящей из бесконечных клиновидных балок.

Вопрос о выборе метода расчета грузоподъемности ледяного покрова имеет весьма существенное значение для теории и практики ледовых переправ. Выбору расчетной схемы должно предшествовать рассмотрение имеющегося экспериментального материала, данных натурных наблюдений и установления основных физических предпосылок для построения теории работы ледяного покрова под нагрузкой.

Методы, разработанные на положениях теории упругости, дают точное теоретическое решение задачи об упругой деформации ледяного покрова. Вот почему эти методы наиболее часто используются для расчета грузоподъемности ледяного покрова. Ледяной покров представляется в данном случае в виде упругой тонкой плиты бесконечных размеров, покоящейся на упругом основании.

(Главной задачей расчета является определение допускаемых предельных нагрузок в зависимости от размеров груза, толщины и структуры ледяного покрова, изменения метеорологических условий и характера водоема. Задача решается для двух схем деформации ледяного поля в зависимости от вида нагрузки:

- для центрального изгиба) при нагрузке, равномерно распределенной по площади круга некоторого радиуса;
- для центрального изгиба при нагрузке, равномерно распределенной вдоль бесконечно длинной полосы.

В зависимости от соотношения размеров груза и толщины льда

решение практических задач сводится к одной из этих схем. В обоих случаях предполагается, что размеры ледяного поля не ограничены во всех направлениях. Это означает, что они должны во всяком случае превосходить длину области прогибов.

Расчетная схема для центрального изгиба применяется при выполнении условия [2]:

$$a \leq \left[2.35\sqrt{b} + 1.18 \frac{\sqrt[4]{h_{\text{л}}^3}}{\sqrt{b}} \right]^2, \quad (11.1)$$

где a – длина груза (грузового поезда), м; b – ширина груза (грузового поезда), м; $h_{\text{л}}$ – расчетная толщина льда, м.

При длине груза (грузового поезда), превышающей значение правой части уравнения (11.1), расчет проводится по схеме для цилиндрического изгиба.

Грузоподъемность льда, т.е. предельно допустимая нагрузка на него, рассчитывается при кратковременном статическом положении груза или его медленном движении, когда возникают наиболее неблагоприятные напряжения в ледяном покрове. На случай непредвиденной остановки груза учитывается запас прочности льда при его пластической деформации. Определение предельно допустимых нагрузок на лед производится с учетом толщины и текстуры ледяного покрова и гидрометеорологических условий. Для практического определения грузоподъемности льда используется его расчетная толщина, равная сумме толщин прозрачного и мутного слоев с коэффициентами соответственно 1.0 и 0.5. Слой льда, состоящий из смерзшегося снега, в расчет не принимается.

(Расчетная температура поверхности льда $T_{\text{л}}$ определяется по формуле

$$T_{\text{л}} = c\delta T_a, \quad \delta = 1 \quad (11.2)$$

где T_a – средняя температура воздуха за срок не менее чем за трое предшествующих суток, °С; δ – коэффициент, учитывающий расчетный слой и равный 1.0, 0.5 и 0.25 соответственно для поверхностного, среднего и нижнего слоев; c – коэффициент Девики, равный

$$c = \frac{\lambda_{\text{с}} h_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}} h_{\text{с}} + \lambda_{\text{с}} h_{\text{л}}}; \quad (11.3)$$

h_c — толщина снега на льду, м; λ_l и λ_c — теплопроводности соответственно льда и снега, равные 2.22 и 0.75 Вт/(м²·°С).

При определении расчетной температуры льда для арктических условий возможно использование графиков (рис. 11.1), по которым температура льда определяется как средняя, отнесенная ко всему слою льда.

(Допускаемые напряжения на лед σ (кН/м²) определяются по графикам, построенным на основании экспериментальных исследований (рис. 11.2) и таблицы для коэффициента N (табл. 11.1), определяемого в зависимости от назначения, типа переправы и состояния ледяного покрова.

Таблица 11.1. Значения коэффициента N

Т и п переправы	Ненарушен- ный ледяной покров пос- тоянной толщины	Ледяной покров неравно- мерной толщины	Ледяной покров с сухи- ми тре- щинами	Ледяной покров, имеющий сквозные трещины
Единовременные или перио- дически действующие автотран- спортные переправы с про- пуском груза на пределе прочности	1.00	1.20	1.25	1.60
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие периодически	1.20	1.50	1.75	2.00
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие постоянно	1.50	1.50	1.75	-
Автотранспортные и гужевые трассы с верхним строением, действующие постоянно	1.30	1.30	1.50	-
Железнодорожные переправы	2.00	2.00	2.00	-

(Грузоподъемность льда для случая центрального изгиба $G_{\max}$ при средних условиях рассчитывается по формулам, полученным при незначительных допущениях в задании значений коэффициента Пуассона и модуля упругости, для различных видов льда.

А) Для весеннего слабого льда

$$G_{I,\max} = \frac{\pi ab \sigma \sqrt[4]{h_{II}^5}}{52.8 \left[0.58 \sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{II}^3} \right]}. \quad (11.4)$$

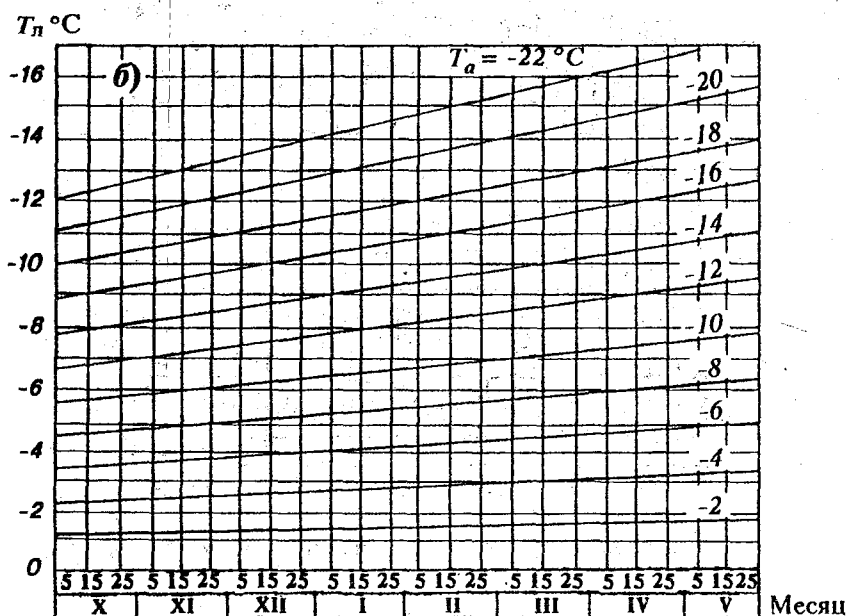
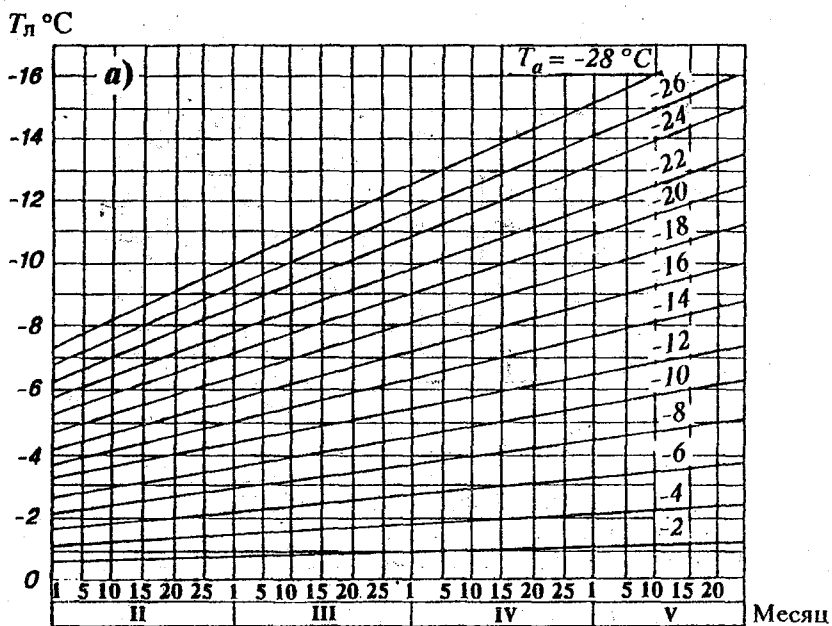


Рис. 11.1. Графики для определения температуры поверхности льда.
 а - ледяной покров со снегом; б - ледяной покров без снега.

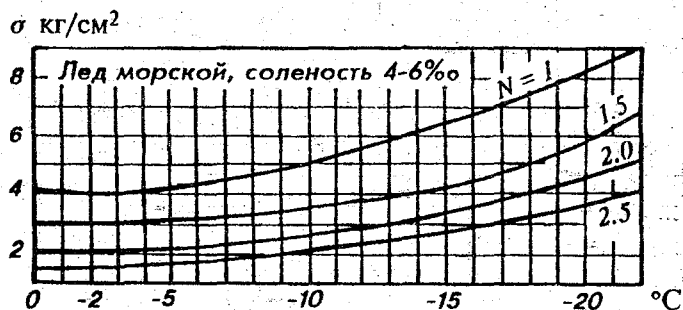


Рис. 11.2. Графики для определения допускаемых напряжений.

Б) Для зимнего льда под снежным покровом

$$G_{2,\max} = \frac{\pi ab \sigma \sqrt[4]{h_{\pi}^5}}{105.6 \left[0.41 \sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{\pi}^3} \right]} \quad (11.5)$$

В) Для зимнего льда без снежного покрова при температуре воздуха ниже -25°C

$$G_{3,\max} = \frac{\pi ab \sigma \sqrt[4]{h_{\pi}^5}}{124.0 \left[0.38 \sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{\pi}^3} \right]} \quad (11.6)$$

Для определения грузоподъемности льда (для упрощения вычислений) при центральном изгибе построены графики (рис. 11.3) зависимости грузоподъемности от толщины льда h_{π} , допустимого напряжения σ и радиуса распределения нагрузки r на лед, который определяется по формуле

$$r = \frac{\sqrt{ab}}{2} \quad (11.7)$$

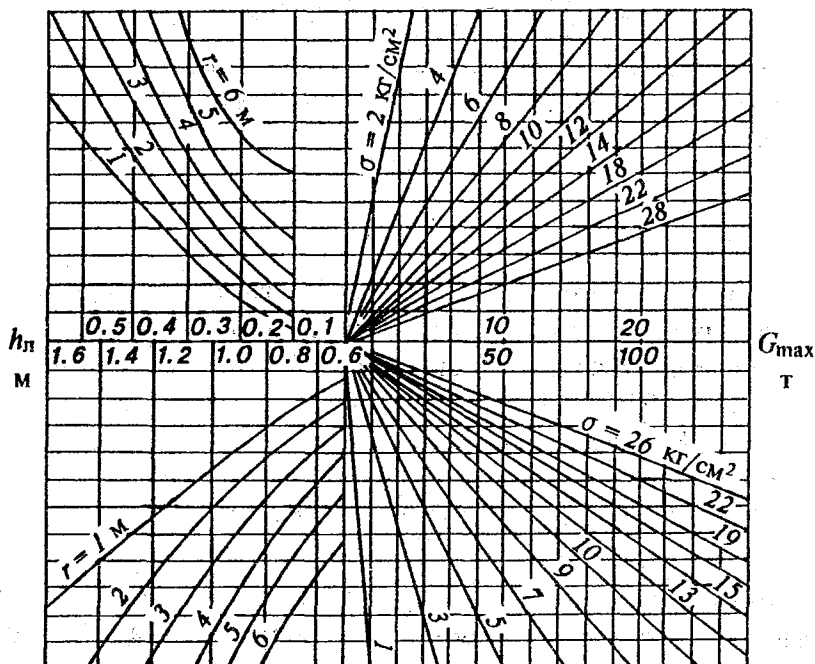


Рис. 11.3. График для определения грузоподъемности льда при центральном изгибе.

2 (Допустимое время t (ч) стоянки груза заданного веса G на льду с рассчитанной грузоподъемностью при его центральном изгибе определяется по формуле

$$t = 20 \left[\frac{(G_{\max} - G)^2}{G_{\max} G} (n + 3) \right]^3, \quad (11.8)$$

где коэффициент n (опытный коэффициент) равен нулю для груза, стоящего на льду без снега при температуре воздуха выше -10°C , $n=1$ – на нерасчищенном льду при температуре воздуха ниже -5°C , $n=2$ – на льду без снега при температуре воздуха ниже -10°C . В случае, если $G_{\max} = G$ (G – вес груза), время стоянки груза равно нулю ($t=0$). Это означает, что при выполнении грузовых операций на ледяном покрове задержки в движении приведут к пролому льда.

1 (Для случая цилиндрического изгиба допустимый вес, приходящийся на нагруженную полосу длиной a и шириной b , рассчитывается по формуле

$$G_{\max} = \frac{ab\sigma\sqrt{h_{\pi}}}{1.73\sqrt{E} \sin\beta(\operatorname{ch}\beta - \operatorname{sh}\beta)}, \quad (11.9)$$

где E – модуль упругости, принимаемый для пресного льда равным $3.92 \cdot 10^6$ кН/м², а для морского льда – $1.96 \cdot 10^6$ кН/м²;

$$\beta = \frac{b}{2.4\sqrt{\frac{Eh_{\pi}^3}{3}}}. \quad (11.10)$$

Для расчета грузоподъемности ледяного покрова при цилиндрическом изгибе построены графики (рис. 11.4).

Допустимое время t (ч) стоянки груза заданного веса G на льду с рассчитанной грузоподъемностью при цилиндрическом изгибе определяется по формуле

$$t = \left[103.31 \frac{1 + |T_a|}{\sqrt{E/3}} \right] \cdot \left[\frac{G_{\max}}{G} - 1 \right]. \quad (11.11)$$

(Анализ несущей способности ледяного покрова, основанный на теории упругости, и рассмотренный метод расчета грузоподъемности позволяют получить лишь приблизительные оценки грузоподъемности, особенно при длительных нагружениях. Однако этот

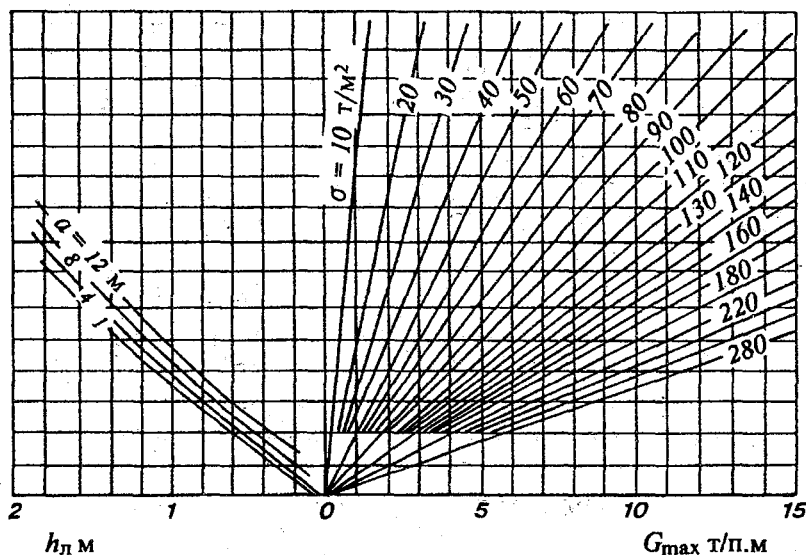


Рис. 11.4. График для определения грузоподъемности льда при цилиндрическом изгибе.

способ расчета широко используется в инженерной практике для определения грузоподъемности ледяного покрова на кратковременную или медленно движущуюся нагрузку.)

Кроме расчета грузоподъемности и допустимого времени стоянки грузов для обеих схем деформации ледяного покрова при организации ледовой переправы по транспортировке грузов для расчета времени работы трассы определяется также зависимость скорости движения V (км/ч) от отношения нагрузок на ледяной покров по трассе G_v/G и критической скорости $V_{кр}$ (км/ч), от глубины водоема H (м) и толщины льда $h_{л}$ (м) (рис. 11.5).

Исходные данные

1. Маршрут по ледовой трассе (рис. 1 на с. 184) и дата выполнения транспортных операций на трассе.
2. Состояние ледяного покрова по разрезу в районе ледовой трассы и глубина водоема по разрезу (трассе).
3. Температура воздуха по прогнозу T_a , °C.
4. Число транспортных средств и их характеристики.

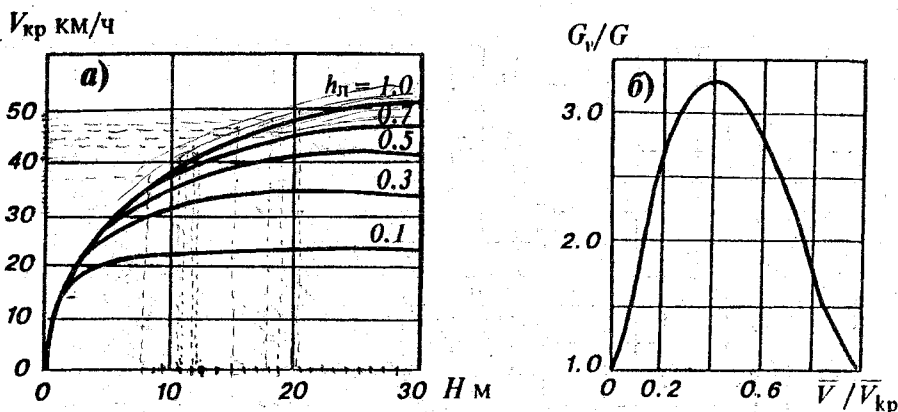


Рис. 11.5. Графики для определения влияния скорости движения грузов на грузоподъемность ледяного покрова.

Порядок выполнения работы

1. Определить температуру поверхности льда $T_{\text{л}}$.

Температура поверхности льда определяется по формуле (11.2) или с использованием графиков (см. рис. 11.1) по всем точкам ледового разреза (трассы). Температура воздуха определяется по прогнозу за период не менее чем за трое суток до начала работы ледовой трассы.

2. Определить схему расчета грузоподъемности ледяного покрова.

Схема расчета грузоподъемности определяется по неравенству (11.1). За расчетную толщину льда в данном случае принимается значение $h_{\text{л}}$ по данным наблюдений.

3. Определить допускаемые напряжения σ (кН/м²) на лед по ледовой трассе.

Допускаемые напряжения на лед определяются по всем точкам разреза в зависимости от состояния ледяного покрова по графикам (см. рис. 11.2) и с учетом коэффициента запаса N (табл. 11.1).

4. Определить грузоподъемность льда G_{max} (кН) по точкам ледовой трассы.

Грузоподъемность льда рассчитывается по формулам (11.4)–(11.6) и (11.9) или по графикам (см. рис. 11.3, 11.4) в зависимости от принятой схемы расчета и состояния ледяного покрова для каждой точки разреза (трассы).

В случае, если грузоподъемность льда в одной или более точках разреза меньше веса груза, т.е. толщина льда не позволяет перевозить груз

таким составом поезда, расчет повторяется для грузового поезда с меньшим количеством прицепных саней.

5. Рассчитать допустимое время t (ч) стоянки поезда с грузом.

Допустимое время стоянки груза рассчитывается по формулам (11.8) и (11.11). При определении веса поезда G (кН) учитывается вес трактора, саней, составляющих поезд, и вес груза на санях.

6. Рассчитать среднюю критическую скорость $\bar{V}_{кр}$ (км/ч) движения поезда с грузом.

Средняя критическая скорость по трассе рассчитывается по критическим скоростям $V_{кр}$, определенным по графику (рис. 11.5 а) в зависимости от глубины моря и толщины льда в точках разреза.

7. Определить среднюю скорость движения $\bar{V}$ (км/ч) поезда с грузом.

Средняя скорость движения определяется по средней критической скорости с учетом отношения нагрузок (рис. 11.5 б), т.е. при максимальном запасе грузоподъемности ледяного покрова ($G_v/G = \max$ и $\bar{V}/\bar{V}_{кр} = 0.4$).

8. Рассчитать время τ (ч), требуемое на транспортировку груза по трассе.

Время транспортировки груза определяется по длине трассы и средней скорости движения грузового поезда.

9. Анализ результатов.

При выполнении анализа результатов расчетов определить наиболее оптимальное использование транспортных средств при перевозке максимального количества груза.

Пример выполнения работы

В а р и а н т - 31

Район трассы Енисейский залив, разрез XIII

Дата выполнения грузовых операций 01.02

Длина ледовой трассы 33.34 км

Средняя температура воздуха -17.20 °C

Возможны 5 вариантов перевозки груза.

Состояние ледяного покрова

Ледяной покров со снегом, лед пресный, прозрачный

Число транспортных средств

1 трактор и 5 саней

25
+ 4,4

Длина трактора	4.4 м	Длина саней	5.0 м
Ширина трактора	3.6 м	Ширина саней	3.5 м
Масса трактора	10.0 т	Масса саней	0.5 т
Грузоподъемность саней	10.2 т		
Расстояние между трактором и санями	1.5 м		

294

Коэффициент запаса N для расчета напряжений 1.50

Вариант – 1

1 трактор и 5 саней

Вес груза и поезда: 622.9 кН Длина поезда с грузом: 37.2 м

N	$h_{л}$ см	$h_{с, min}$ см	H м	$T_{л}$ °С	σ кН/м ²	G_{max} кН	t ч	$V_{кр}$ м/с
1	79.0	12.0	21.0	-11.87	1350.91 cil	786.84	0.43	46.13
2	78.0	12.7	23.0	-11.59	1341.11 cil	769.27	0.39	46.61
3	88.0	13.5	26.6	-11.83	1349.61 cil	895.05	0.72	48.88
4	66.0	14.2	29.0	-10.49	1301.80 cil	611.33	-	-
5	76.0	15.0	26.2	-10.86	1314.82 cil	731.04	0.29	47.25
6	106.0	15.8	19.0	-11.95	1353.81 cil	1124.22	1.32	48.26
7	103.0	16.5	13.0	-11.67	1343.84 cil	1077.82	1.20	40.84
8	106.0	17.3	5.5	-11.61	1341.72 cil	1114.18	1.30	29.25
9	90.0	18.0	3.0	-10.80	1312.92 cil	894.63	0.72	22.75

Перевозить груз таким вариантом поезда по данной трассе нельзя

Вариант – 2

1 трактор и 4 саней

Вес груза и поезда: 518.0 кН Длина поезда с грузом: 30.6 м

N	$h_{л}$ м	$h_{с, min}$ м	H м	$T_{л}$ °С	σ кН/м ²	G_{max} кН	t ч	$V_{кр}$ м/с
1	79.0	12.0	21.0	-11.87	1350.91 cil	648.11	0.41	46.13
2	78.0	12.7	23.0	-11.59	1341.11 cil	633.64	0.37	46.61
3	88.0	13.5	26.6	-11.83	1349.61 cil	737.24	0.70	48.88
4	66.0	14.2	29.0	-10.49	1301.80 cil	503.54	-	-
5	76.0	15.0	26.2	-10.86	1314.82 cil	602.15	0.27	47.25
6	106.0	15.8	19.0	-11.95	1353.81 cil	926.01	1.30	48.26
7	103.0	16.5	13.0	-11.67	1343.84 cil	887.78	1.17	40.84
8	106.0	17.3	5.5	-11.61	1341.72 cil	917.74	1.27	29.25
9	90.0	18.0	3.0	-10.80	1312.92 cil	736.90	0.70	22.75

Перевозить груз таким вариантом поезда по данной трассе нельзя

Вес груза и поезда: **413.0 кН**Длина поезда с грузом: **24.1 м**

<i>N</i>	<i>h</i> _л м	<i>h</i> _{с, min} м	<i>H</i> м	<i>T</i> _л °С	<i>σ</i> кН/м ²		<i>G</i> _{max} кН	<i>t</i> ч	<i>V</i> _{кр} м/с
1	79.0	12.0	21.0	-11.87	1350.91	cen	870.53	31.58	46.13
2	78.0	12.7	23.0	-11.59	1341.11	cen	848.29	25.31	46.61
3	88.0	13.5	26.6	-11.83	1349.61	cen	1019.43	106.63	48.88
4	66.0	14.2	29.0	-10.49	1301.80	cen	647.06	1.38	46.05
5	76.0	15.0	26.2	-10.86	1314.82	cen	800.79	15.04	47.25
6	106.0	15.8	19.0	-11.95	1353.81	cen	1353.83	634.80	48.26
7	103.0	16.5	13.0	-11.67	1343.84	cen	1286.16	473.08	40.84
8	106.0	17.3	5.5	-11.61	1341.72	cen	1341.74	603.42	29.25
9	90.0	18.0	3.0	-10.80	1312.92	cen	1025.42	111.14	22.75

Средняя критическая скорость движения по трассе **41.78 км/ч**Средняя скорость с учетом отношений нагрузок **16.71 км/ч**

При движении со скоростью 16.71 км/ч время доставки груза 1.99 ч

При движении со скоростью 41.78 км/ч время доставки груза 0.80 ч

Литература

1. Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е. Морской лед. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
2. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. – Л.: Морской транспорт, 1963. – 345 с.

Работа № 12

Определение мощности вдольберегового потока наносов и заносимости каналов под воздействием волн

Задачи работы

1. Ознакомиться с методикой определения вдольберегового потока наносов.
2. Определить вдольбереговую составляющую потока энергии и средний годовой объем наносов; перемещаемых вдоль берега.
3. Ознакомиться с одной из методик расчета заносимости каналов под воздействием ветра и волн.
4. Определить среднее значение заносимости канала в районе его предполагаемого строительства.

При проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений и морских каналов проводятся исследования деформации рельефа дна и берегов под воздействием волнения, а также выполняются оценки возможных изменений установившегося потока наносов.

При косом подходе волн к берегу возникающие энергетические вдольбереговые течения переносят большое количество песка, поднимаемого со дна волнением. В конечном итоге этот массовый перенос осадков и его изменение вдоль берега определяют очертание береговой линии, участки аккумуляции и размыва на подводном склоне. С увеличением силы штормов возрастает интенсивность вдольбереговых составляющих течений и, как следствие этого, при достаточном количестве взвешенных осадков вдольбереговой поток наносов. Наибольшая скорость вдольберегового течения обычно имеет место между двумя зонами повышенного расходования волновой энергии: между зонами заплеска и разрушения. В то же время движение взвешенных наносов вдоль берега не бесконечно. Этому

движению препятствует извилистость береговой линии и сложность рельефа подводного склона.

В группе гидрогенных перемещений осадочного материала выделяется несколько основных элементов: начало движения частиц, донное перемещение, перенос во взвеси в рифельную и гладкую фазы движения осадков. Эти механизмы, характеризующие процесс перемещения осадков, называются элементарными процессами при анализе литодинамических систем в океане.

Режим литодинамических процессов в прибрежных районах в значительной степени связан с вдольбереговым перемещением наносов, которое характеризуется годовой мощностью их потока – средним годовым объемом наносов, переносимых вдоль берега через живое сечение в пределах береговой зоны. В зависимости от степени насыщения потока наносов, равного отношению его мощности к емкости (максимально возможному объему наносов, которое может быть перемещено при данных гидрометеорологических условиях), происходит либо образование аккумулятивных береговых форм (степень насыщения больше единицы), либо размыв берега и дна при дефиците наносов (степень насыщения меньше единицы). При пересечении потоком наносов подводной выемки в морском канале происходит увеличение живого сечения потока, что приводит к уменьшению его емкости, аккумуляции наносов и заносимости канала.

При изучении режима наносов и динамики берегов проводятся натурные исследования, эмпирико-теоретические расчеты и лабораторное моделирование процессов переноса наносов в береговой зоне. Расчеты являются одним из методов исследований перемещения наносов, которые применяются в случае невозможности получить необходимые режимные характеристики перемещения наносов на основе наблюдений и дают приближенные решения, поскольку содержат ряд допущений и требуют уточнения путем их сопоставления с имеющимся натурным материалом и результатами лабораторного моделирования.

Для расчета интенсивности перемещения наносов вдоль берегов разработаны следующие методы [1]:

– гидрометеорологический, основанный на использовании сведений о ветре и волнении в прибрежной зоне;

- гидравлический, с помощью которого расход наносов определяется по их концентрации в воде и скорости потока;

- эмпирические, в которых используются зависимости расхода и аккумуляции наносов от их состава, элементов волнения и морфологических характеристик береговой зоны.

Одними из наиболее широко используемых на практике и наиболее простых методов расчета интенсивности перемещения наносов вдоль берега являются гидрометеорологические методы: ветроэнергетические, волноэнергетические и ветроволноэнергетические.

Ветроэнергетические методы обычно используются при исследовании перемещения наносов на отмелях песчаных и песчано-гравийных берегах. Волноэнергетические – на сравнительно крутых гравийно-галечных берегах. При сложных условиях волнообразования в прибрежной зоне и значительной изрезанности береговой черты применяются ветроволноэнергетические методы. На практике чаще всего используются ветроэнергетические методы, как наиболее простые из гидрометеорологических методов и позволяющие установить связь между интенсивностью перемещения наносов и энергией ветра.

В основе одного из этих методов лежит расчет условной энергии ветра E_p для каждого из восьми румбов направлений ветра через 45° по формуле

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^m p_i W_i^2 \sqrt[3]{X K}}{1000} n, \quad (12.1)$$

где W_i – средняя скорость ветра данного направления для i -й градации по скорости, м/с; X – длина разгона ветра, км; p_i – повторяемость (%) средней скорости ветра i -й градации выбранного направления; K – коэффициент полноты сектора румба, соответствующего данному направлению (рис. 12.1); n – коэффициент понижения энергии волнения при малых глубинах (табл. 12.1); m – число градаций скорости ветра.

Длина разгона ветра влияет на параметры волнения только до определенного расстояния, т.е. имеется предельное значение разгона ветра, при котором формируется максимально развитое волнение (в предположении достаточно продолжительного действия ветра). Для определения предельного разгона ветра по румбам $X_{пр}$ на мелководье можно использовать следующую зависимость:

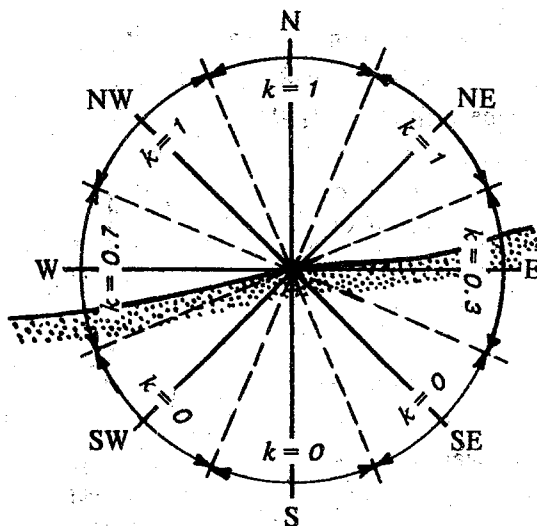


Рис. 12.1: Пример определения коэффициента k .

$$X_{\text{пр}} = 0.8W^2 n_I, \quad (12.2)$$

где $n_I = 0.18 \sqrt{H_x}$; H_x – средняя глубина моря по направлениям ветра. При длине разгона ветра, превышающей $X_{\text{пр}}$, за длину разгона в расчетах принимается значение $X_{\text{пр}}$.

Геометрическое суммирование составляющих энергии ветра по направлениям, рассчитанных для заданного периода времени или в среднем за год, дает суммарную энергию ветра, передаваемую водной поверхности за соответствующий период:

$$E = \sum E_p. \quad (12.3)$$

Для решения инженерных задач определяются: вдольбереговая составляющая потока

энергии волн, пропорциональная суммарной энергии ветра, называемая наносдвигущей силой T , нормальная к берегу составляю-

Таблица 12.1. Значения коэффициента понижения энергии волнения n

H м	n	H м	n	H м	n
1	0.018	11	0.296	21	0.628
2	0.040	12	0.327	22	0.663
3	0.065	13	0.359	23	0.698
4	0.091	14	0.391	24	0.733
5	0.118	15	0.424	25	0.769
6	0.146	16	0.457	26	0.805
7	0.174	17	0.490	27	0.842
8	0.204	18	0.524	28	0.879
9	0.234	19	0.558	29	0.916
10	0.264	20	0.593	30	0.963

шая – сила прибоя B и угол γ – отклонение равнодействующего вектора E от нормали к береговой линии, или угол α между вектором E и линией берега (рис. 12.2) [1].

Вдольбереговая составляющая потока энергии T может быть определена по формуле

$$T = Ef(\alpha), \quad (12.4)$$

где $f(\alpha)$ – угловая функция, зависящая от угла α , определяемого между направлением вектора E и касательной к берегу (рис. 12.3).

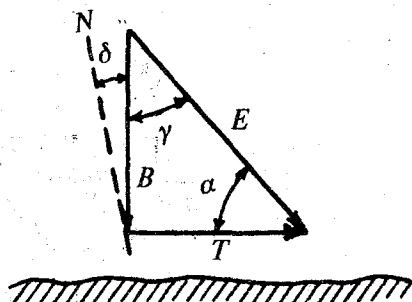


Рис. 12.2. Разложение вектора суммарного потока энергии ветровых волн на наносодвижущую T и прибойную силы B .

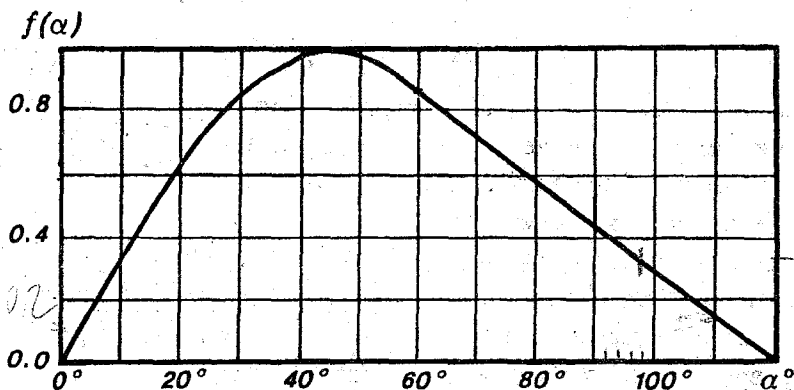


Рис. 12.3. Диаграмма коэффициента связи энергии ветровых волн с наносодвижущей силой.

Средний годовой объем наносов M (тыс.м³), перемещаемый вдоль песчаных берегов с уклоном дна $0.01 \div 0.03$, может быть оценен по рассчитанному значению наносодвижущей силы T с использованием формулы

$$M = 80T^{1.25}. \quad (12.5)$$

Морской судоходный канал – это комплекс технических элементов, обеспечивающих возможность безопасного прохода судов через мелководье и участки суши при движении судна по морским

путям или на подходах к порту. Основными элементами, характеризующими данный морской судоходный канал, являются: трасса канала, определяемая расположением продольной оси в плане; поперечное сечение, продольный профиль дна и уровень воды. Кроме того, к характерным элементам данного канала относится также режим его заносимости и сооружения, защищающие канал от заносимости (оградительные дамбы, прорези-ловушки и др.). Особое внимание при проектировании морских судоходных каналов уделяется вопросам охраны окружающей среды. >

<Весьма важной и трудноразрешимой задачей является обеспечение минимума затрат на строительство канала и поддержание его в требуемом эксплуатационном состоянии. Для выбора трассы канала необходимо принимать во внимание, с одной стороны, обеспечение минимального объема выемки и прохождение прорези канала по относительно легким по трудности разработки грунтам, а с другой - устойчивость откосов прорези и ее минимальная заносимость. При этом следует учитывать, что заносимость прорези канала значительно возрастает при слабых илистых грунтах. При трассировке канала следует также обращать особое внимание на сопряжение трассы с господствующим направлением течений и вдольбереговым потоком наносов. Кроме того, необходимо обеспечивать не только минимальную заносимость канала, но и минимальное влияние канала на устойчивость берегов.

Различают две глубины канала: навигационную H_n и проектную H_k . Навигационная глубина обеспечивает безопасность прохода расчетного судна в течение всего периода эксплуатации канала, в том числе и в промежутки времени перед проведением ремонтных дноуглубительных работ. Проектная глубина канала определяется с учетом заносимости прорези канала

$$H_k = H_n + \delta h, \quad (12.6)$$

где δh — запас на заносимость (м), который выбирается или рассчитывается в зависимости от ожидаемой интенсивности отложения наносов в канале в период между ремонтными дноуглубительными работами.

В наиболее простом методе для определения заносимости канала используется сумма абсолютных значений составляющих энер-

гии ветра по выбранным направлениям (румбам). Эмпирическая формула для определения среднемноголетнего значения за рассматриваемый период по всей длине канала слоя наносов Δh (м) имеет следующий вид:

$$\Delta h = \left[\sum_{i=1}^8 |E_p| \right]^2 \left[1 - \frac{H_{\text{ср}}}{H_k} \right], \quad (12.7)$$

где $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина моря по трассе канала, м; H_k – проектная глубина канала, м.

Исходные данные

1. Повторяемость направлений и скоростей ветра по многолетним данным в районе порта.
2. Длина разгона ветра по направлениям (румбам) *(определяется по карте района)*.
3. Средние глубины моря по трассе канала $H_{\text{ср}}$ (м) и по направлениям действия ветра H_x (м) *(определяются по карте района)*.
4. Проектная глубина канала H_k (м) *(определяется в зависимости от глубины моря)*.
5. Угол наклона нормали δ к берегу от меридиана.

Порядок выполнения работы

1. Определить длины разгонов ветра по румбам и рассчитать предельные разгоны ветра.

Длина разгона ветра по румбам определяется по карте, а предельные длины разгонов – по формуле (12.2) для средней глубины моря по направлению действия ветра. При длине разгонов ветра, превосходящих предельные, за длину разгонов принимаются их предельные значения.

2. Определить среднюю глубину моря по трассе канала.
✓ *Средняя глубина моря по трассе канала определяется по карте.*
3. Рассчитать энергию ветра в условных единицах для каждого из восьми направлений через 45° .

Энергия ветра для каждого румба рассчитывается по формуле (12.1). Коэффициент полноты K определяется как отношение ко всему румбовому сектору активной его доли, т.е. вычитается часть сектора в долях единицы, приходящаяся на береговой ветер (см. рис. 12.1).

Значения коэффициента n определяются по табл. 12.1 по средней глубине моря H_x и направлениям действия ветра.

4. Определить суммарную энергию ветра по румбовым значениям энергии.

Суммарная энергия E определяется по формуле (12.3) как геометрическая сумма энергий E_p , рассчитанных по всем румбам (рис. 12.4).

5. Определить в условных единицах наносодвижущую силу T .

Наносодвижущая сила рассчитывается по формуле (12.4) с использованием угловой функции $f(\alpha)$, определенной по углу α между вектором E и касательной к линии берега.

6. Рассчитать средний объем M (тыс.м³) вдольберегового потока наносов.

Средний объем вдольберегового потока наносов рассчитывается по формуле (12.5) для каждого расчетного месяца.

7. Рассчитать слой наносов Δh (м) для всего морского канала.

Слой наносов для морского канала рассчитывается с использованием формулы (12.7) для каждого рассматриваемого месяца.

8. Анализ результатов.

В анализе результатов оценить характер изменчивости наносодвижущей силы и объема вдольберегового потока наносов за рассматриваемые периоды в пределах береговой зоны, прилегающей к порту. Дать характеристику заносимости морского канала в районе порта за рассматриваемые периоды.

Пример выполнения работы

В а р и а н т 31

п. Копорская губа

Апрель

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	k	H_x км	n
С	9.90	0.60	0.30	0.20	0.00	0.00	1.00	20.00	0.5930
СВ	1.60	0.80	0.50	0.05	0.05	0.02	1.00	5.00	0.1180
В	3.50	4.80	2.80	1.90	2.70	0.30	-	-	-
ЮВ	3.30	6.00	4.80	3.80	1.75	0.33	-	-	-
Ю	4.80	5.10	4.60	3.80	2.90	0.40	-	-	-
ЮЗ	4.20	4.00	3.70	2.50	2.70	0.05	-	-	-
З	1.90	1.50	0.40	0.20	0.05	0.05	0.30	7.00	0.1740
СЗ	5.90	0.90	0.15	0.20	0.00	0.00	1.00	21.00	0.6280

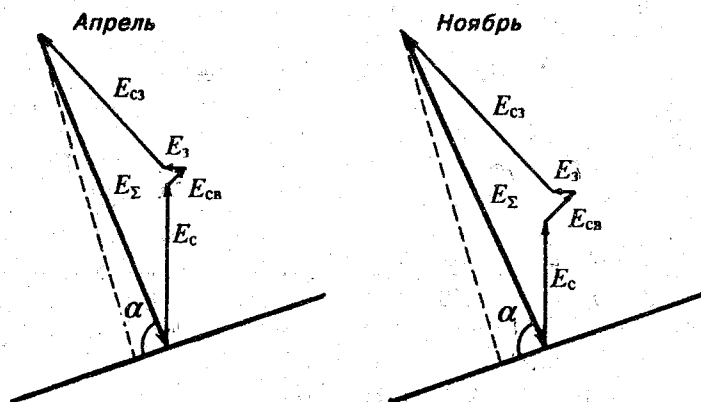
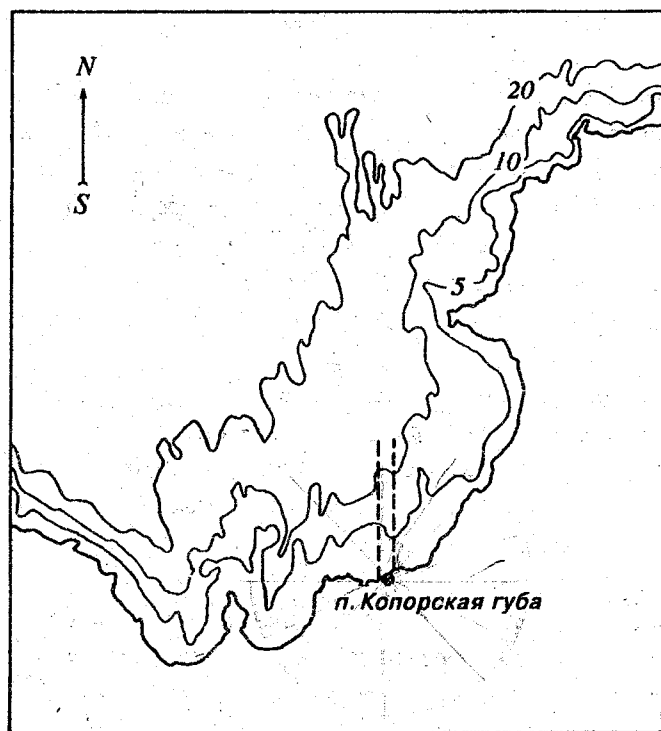


Рис. 12.4. Схема расположения канала и расчет суммарной энергии ветра.

ср. W

	0.5	3.5	7.5	11.5	15.5	19.0	PW	$X_{км}$	$X_{пр/км}$	E_p
С	1.24	25.73	126.56	304.18	0.00	0.00	457.70	53.20	232.48	1.0208
СВ	0.20	34.30	210.94	76.04	186.19	137.18	644.86	10.00	116.24	0.1639
В	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЮВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ю	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЮЗ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.24	64.31	168.75	304.18	186.19	342.95	1066.62	15.40	137.54	0.1385
СЗ	0.74	38.59	63.28	304.18	0.00	0.00	406.78	98.60	238.22	1.1802

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	k	H_x км	n
С	1.90	0.80	0.40	0.10	0.00	0.00	1.00	20.00	0.5930
СВ	1.80	1.80	0.90	0.20	0.10	0.00	1.00	5.00	0.1180
В	4.60	5.10	4.80	4.80	0.80	0.15			
ЮВ	4.00	6.40	4.90	4.90	0.90	0.20			
Ю	5.60	5.70	4.90	3.90	1.10	0.10			
ЮЗ	5.60	5.60	5.80	4.80	1.00	0.25			
3	1.80	1.30	0.60	0.30	0.05	0.05	0.30	7.00	0.1740
СЗ	0.90	0.50	0.40	0.20	0.00	0.00	1.00	21.00	0.6280

	0.5	3.5	7.5	11.5	15.5	19.0	PW^2	$X_{км}$	$X_{пр км}$	E_p
С	0.24	34.30	168.75	152.09	0.00	0.00	355.38	53.20	232.48	0.7926
СВ	0.23	77.17	379.69	304.18	372.39	0.00	1133.65	10.00	116.24	0.2882
В	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЮВ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ю	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЮЗ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.23	55.74	253.13	456.26	186.19	42.95	1294.49	15.40	137.54	0.1681
СЗ	0.11	21.44	168.75	304.18	0.00	0.00	494.48	98.60	238.22	1.4346

Месяц	E , усл.ед.	α	$f(\alpha)$	T	M тыс.м ³	ΣE_p	$H_{ср}$ м	H_k м	Δh м
Апрель	2.1495	84.5	0.51	1.090	89.078	2.5034	8.20	10.00	1.13
Ноябрь	2.2363	82.0	0.54	1.211	101.594	2.6835	8.20	10.00	1.30

Литература

1. Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях. — М.: Гидрометеиздат, 1975. — 239 с.

Работа № 13

Расчет эксплуатационных характеристик приливной электростанции (ПЭС) по параметрам прилива

Задачи работы

1. Ознакомиться с методами оценки энергетических ресурсов бассейна приливной электростанции.
2. Ознакомиться с графическим методом расчета эксплуатационных характеристик приливной электростанции, используя известные параметры прилива.
3. Рассчитать основные рабочие характеристики приливной электростанции.

Истощение природных запасов топлива и интенсивный рост энергопотребления, вызываемый научно-техническим прогрессом, периодически обуславливает повышенный интерес к проблеме использования нетрадиционных источников энергии, в частности приливной энергии. Приливная энергия (пульсирующая, из-за характера прилива, прерывистая, из-за особенностей работы приливной электростанции, но неизменно гарантированная), объединенная в энергосистему страны, может быть управляемой и подаваться частично в пик графика нагрузки, а частично в его базовую часть, при этом экономится природное горючее. На примере различных стран, берега которых омываются морями с высокими приливами, был показан возможный энергетический эффект от осуществления строительства приливных электростанций. Районами повышенного энергосодержания приливной энергии являются заливы Фанди, Бристольский, Пенжинский, Тугурский, Бенгальский, Сен-Мало и участки Патагонского побережья Аргентины. Эти районы в первую очередь считаются перспективными с точки зрения промышленного использования приливной энергии [2,3].

Энергия приливных движений в океане создается в результате

работы, совершаемой приливообразующими силами, возникающими при гравитационном взаимодействии Земли, Луны и Солнца, и теряется за счет диссипации, обусловленной силами трения, а также в результате энергообмена с твердым телом Земли и атмосферой. В процессе приливных движений энергия может переходить из кинетической формы в потенциальную и обратно. Общее количество приливной энергии в Мировом океане (глобальное энергосодержание) E выражается в виде [1,2]

$$E = E_k + E_p, \quad (13.1)$$

где E_k и E_p – соответственно кинетическая и потенциальная энергии, определяемые из выражений

$$E_k = 0.5 \rho \iint_{\Omega} H(u^2 + v^2) d\Omega, \quad (13.2)$$

$$E_p = 0.5 \rho g \iint_{\Omega} \eta^2 d\Omega, \quad (13.3)$$

и u и v – компоненты осредненной по вертикали скорости приливного течения вдоль координатных осей, м/с; η – приливное возвышение уровня, м; H – глубина океана, м; ρ – плотность морской воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Ω – площадь Мирового океана, м².

Приливные электростанции представляют собой гидротехническую установку, предназначенную для преобразования приливной энергии, и относятся к низконапорным гидротехническим установкам. Для проектного обоснования ПЭС, как и любой электростанции, необходимо выполнить экономическую оценку ее энергетического эффекта, т.е. определить полезную энергоотдачу и ее гарантированную долю, преобразуемую в используемую мощность. При этом необходимо помнить, что строительство плотины ПЭС и отсечение части акватории морского бассейна при ее сооружении, а также работа агрегатов электростанции могут приводить к существенной перестройке параметров, структуры и энергетических характеристик приливных колебаний. Поэтому оценка эксплуатационных качеств работы ПЭС и оптимального режима ее функционирования, а также объема необходимых строительных работ и возможных экологических последствий должны основываться не просто на данных о наблюдаемых приливных колебаниях, существовавших до начала

строительства, но и на материалах, полученных путем прогностического расчета с учетом возможной трансформации приливного режима после строительства сооружений станции [4].

Для ориентировочных предварительных оценок энергетических ресурсов бассейна приливной электростанции может быть применен упрощенный метод расчета, основанный на использовании понятия энергетического потенциала приливного бассейна, отделенного от открытого моря плотинной ПЭС. Энергетический потенциал характеризует работу, совершаемую в течение года при подъеме и опускании уровня моря относительно его среднего положения $\bar{H}$.

Работа P (кДж), совершаемая приливом в течение его периода при пренебрежимо малых уклонах уровня в пределах бассейна, т.е. при фактически мгновенном заполнении бассейна, равна произведению веса опускаемого или поднимаемого объема воды и высоты, равной амплитуде прилива:

$$P = 2\rho g a^2 \Omega, \quad (13.4)$$

где a – амплитуда колебаний уровня моря, м (рис. 13.1); Ω – площадь бассейна, м²; ρ – плотность воды, равная 1026 кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

При правильном полусуточном приливе в течение суток наблюдается 3.87 однонаправленных изменений уровня. В результате выражение для определения среднесуточной потенциальной мощности $\bar{N}_п$ (кВт) прилива бассейна ПЭС имеет следующий вид [1–3]:

$$\bar{N}_п = 225 A_{ср}^2 \Omega, \quad (13.5)$$

где $A_{ср}$ – средняя величина прилива, м; Ω – площадь бассейна ПЭС, км².

Выражение (13.5) применимо для бассейнов, площадь поверхности которых мало изменяется в течение приливного цикла, а их линейный размер не превышает длины приливной волны в направлении ее распространения. Кроме того, это выражение используется также для определения годового запаса потенциальной энергии (энергетического потенциала) $\mathcal{E}_п$ (кВт·ч) в приливном бассейне площадью Ω (м²) с правильным полусуточным приливом

$$\mathcal{E}_п = 1.97 A_{ср}^2 \Omega. \quad (13.6)$$

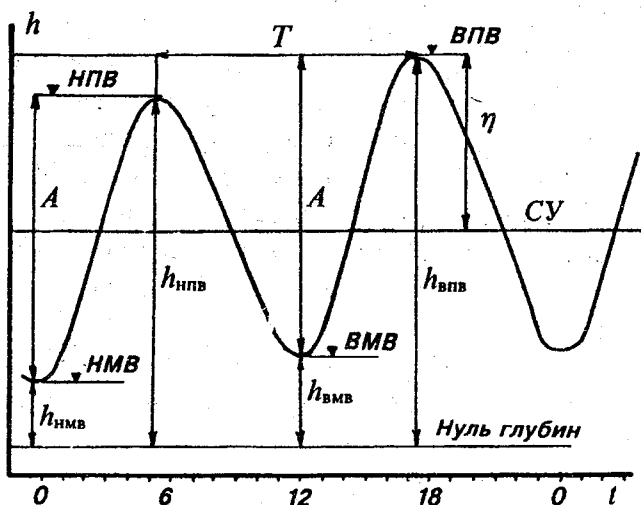


Рис. 13.1. Характеристики приливной волны [2].
 СУ - средний уровень; $h_{ВПВ}$, $h_{НПВ}$ - высоты высокой и низкой полных вод; $h_{ВМВ}$, $h_{НМВ}$ - высоты высокой и низкой малых вод; A - величина прилива; $a = A/2$ - амплитуда прилива; T - период прилива.

В случае использования установок двойного действия, когда турбины работают в постоянном режиме при наполнении и опорожнении бассейна, изменение уровня в нем можно принять по линейному закону. Если известен расход воды через турбину, то можно в каждый момент времени определить высоту уровня воды в бассейне, а по известным параметрам прилива рассчитать напор (разность уровней в море и в бассейне) и определить эксплуатационный режим работы приливной электростанции.

При постоянном рабочем расходе через турбины Q ($\text{м}^3/\text{с}$) (режим, который наиболее часто применяется в приливных электростанциях) уровень на акватории бассейна ПЭС площадью Ω (м^2) за период времени Δt изменяется на величину

$$\Delta h = Q \Delta t / \Omega, \quad (13.7)$$

где

$$Q = 46 \cdot 10^{-6} A_{\text{ср}} \Omega. \quad (13.8)$$

По минимальному значению напора R_{min} , необходимого для

работы турбин в режиме выработки электроэнергии, строится график работы ПЭС, на который наносится ход уровня h_1 у плотины со стороны открытого моря и h_2 на акватории станции (см. рис. 13.2 в примере выполнения работы). На графике определяются периоды действия турбин в рабочем режиме ($t_3 - t_2$) и закрытия водопропускных устройств ($t_4 - t_2$). В остальное время гидротурбины работают в холостую, поскольку напор недостаточен для выработки электроэнергии. Расход воды на этой стадии принимается равным рабочему.

По известным значениям напора и расхода воды рассчитываются:

а) мощность силовой установки N (кВт) на валу турбин при коэффициенте полезного действия, равном 0,8, и напоре R (м) по формуле:

$$N = 0.8QR, \quad (13.9)$$

б) продолжительность выработки электроэнергии приливной станцией в течение суток по площади, расположенной между кривыми хода уровней h_1 и h_2 за рабочий период времени.

Аналогично по графику работы ПЭС определяется выработка электроэнергии в течение месяца и года. Приблизленно среднее значение годовой выработки энергии $\mathcal{E}$ (кВт·ч/год) в приливном бассейне площадью Ω (м²) можно рассчитать по формуле

$$\mathcal{E} = 2.68a^2\Omega. \quad (13.10)$$

Рассмотренный способ расчета эксплуатационных характеристик приливной электростанции и формулы для расчета энергетического потенциала и мощности силовой установки могут применяться для предварительных оценок, но при этом следует учитывать, что [4]:

- формулы справедливы только при отсутствии заметных трансформационных эффектов, т.е. когда природный прилив близок по своей структуре к типу стоячей волны и когда протяженность отсекаемого бассейна пренебрежимо мала по сравнению с местной длиной приливной волны;

- во внимание принимается только потенциальная энергия прилива, а это справедливо в тех случаях, когда сооружение плотины не приводит к заметным трансформационным эффектам;

- формулы действительны только для неизменной в процессе

приливных колебаний площади водной поверхности бассейна;

- формулы получены путем рассмотрения энергосодержания бассейна при квазиравновесном режиме наполнения и опорожнения бассейна, т.е. практически в зарегулированных, а не в природных условиях.

В современных проектах крупных приливных электростанций, предусматривающих отсечение больших по площади акваторий, оценка ожидаемых энергетических параметров станции требует более строгих расчетов.

Исходные данные

1. Ежечасные значения уровня моря в течение суток в одном из пунктов побережья.
2. Площадь бассейна приливной электростанции Ω , км².
3. Минимальный напор $R_{\min}$ (м) необходимый для работы турбин ПЭС.

Порядок выполнения работы

1. Построить ход уровня h_1 по ежечасным значениям (за сутки) в заданном районе побережья.

2. Определить величину прилива a и среднюю амплитуду колебаний уровня $A_{\text{ср}}$.

Средняя величина прилива определяется как средняя между уровнями соседних полной и малой вод. Средняя амплитуда приливных колебаний уровня равна 1/2 средней величины прилива.

3. Рассчитать рабочий расход воды Q (м³/с) через турбину приливной станции.

Рабочий расход воды определяется по формуле (13.8).

4. Определить среднесуточную потенциальную мощность прилива $\bar{N}_п$ (кВт) и годовой запас потенциальной энергии $\mathcal{E}_п$ (кВт·ч).

Расчет этих характеристик выполняется с помощью формул (13.5) и (13.10).

5. Определить изменение уровня на акватории приливной станции h_1 и построить график работы ПЭС с учетом минимального напора $R_{\min}$, необходимого для работы турбин.

Изменение уровня на акватории станции определяется по значению минимального напора $R_{\min}$ и угла (с учетом масштаба графика), полу-

ченного после расчета величины Δh по формуле (13.5) за период времени t (1–1.5 ч). Кривая изменения уровня на акватории ПЭС строится под углом φ при каждом пересечении оси абсцисс до момента времени, когда разность высот уровней h_1 и h_2 не будет равной $R_{\min}$ (рис. 13.2).

6. Определить периоды работы (выработки электроэнергии) и простоя турбин, открытия и закрытия водосливов в течение рассматриваемых суток.

Периоды работы станции в течение суток определяются по графику (рис. 13.2) с учетом значения минимального напора.

7. Рассчитать эксплуатационные характеристики приливной электростанции.

Мощность силовой установки ПЭС N (кВт) рассчитывается по формуле (13.9), а годовая выработка электроэнергии приливной станцией $\mathcal{E}$ (кВт·ч/год) – по формуле (13.10).

8. Анализ результатов.

Дать характеристику работы приливной электростанции в течение суток в заданном пункте и проанализировать режим работы и изменение выработки энергии ПЭС в течение месяца.

Пример выполнения работы

В а р и а н т 31

Охотское море, Тугурский залив. Август 1989.

Площадь бассейна $\Omega = 18 \text{ км}^2$. Минимальный напор $R_{\min} = 0.4 \text{ м}$.

Исходные данные

Часы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Уровень	348	401	391	332	251	147	52	39	44	76	131	217
Часы	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Уровень	319	393	401	365	291	200	115	68	58	72	125	249

Высокая полная вода $h_{\text{ппв}} = 401 \text{ см}$ Высокая малая вода $h_{\text{вмв}} = 401 \text{ см}$

Низкая полная вода $h_{\text{нпв}} = 58 \text{ см}$ Низкая малая вода $h_{\text{нмв}} = 39 \text{ см}$

Средняя высота прилива $A = 352.5 \text{ см}$

Расход через турбины $Q = 2918.7 \text{ м}^3/\text{с}$

Изменение расхода $\Delta h = 0.58 \text{ м}$

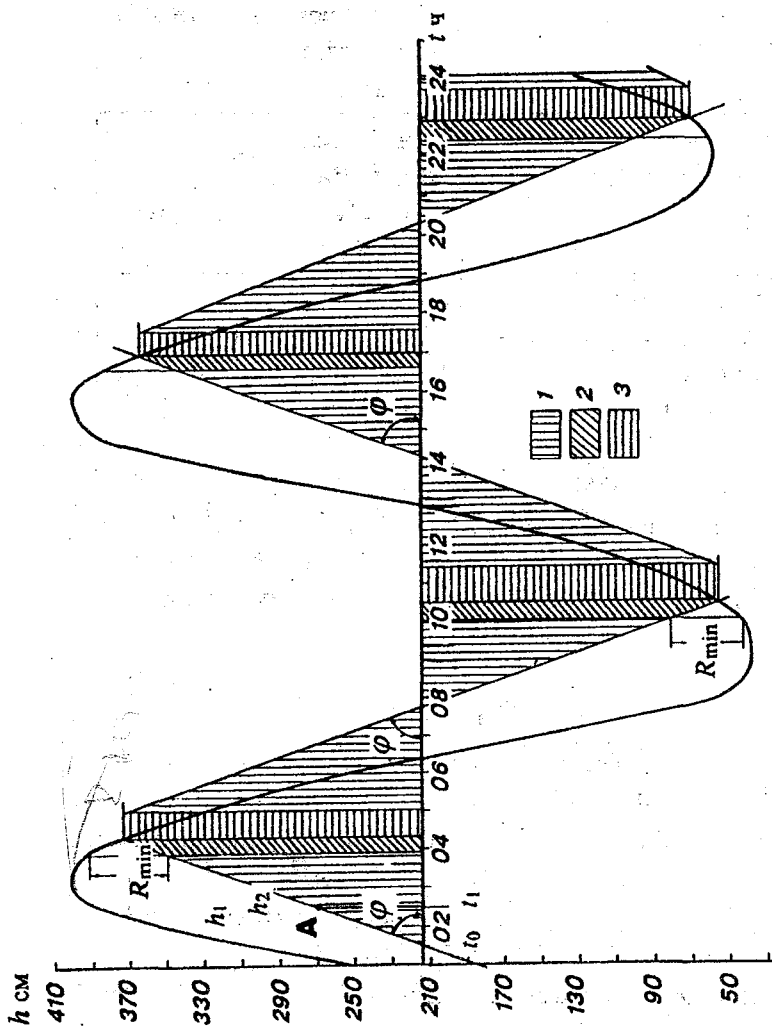


Рис. 13.2. Изменение уровня моря h_1 и график работы ПЭС h_2 .
 t – продолжительность работы генераторов (t_2-t_3); 2 – период
 выравнивания уровней моря и на акватории ПЭС (t_3-t_4); 3 –
 период закрытых водосливов (t_4-t_2).

Периоды и характеристики работы ПЭС

Режим работы	Продолжительность работы
1. Продолжительность работы турбин и генератора ($t_2 - t_3$)	2 ч 54 мин 5 ч 03 мин 5 ч 09 мин 19 ч 15 мин 4 ч 51 мин 1 ч 18 мин
2. Продолжительность отключения генератора ($t_3 - t_4$)	0 ч 24 мин 0 ч 27 мин 0 ч 24 мин 1 ч 45 мин 0 ч 30 мин
3. Продолжительность отключения ПЭС, водосливы закрыты ($t_3 - t_4$)	0 ч 42 мин 0 ч 57 мин 0 ч 33 мин 3 ч 00 мин 0 ч 48 мин

Среднесуточная потенциальная мощность $\bar{N}_п = 5.032 \cdot 10^4$ кВт
 Энергетический потенциал бассейна ПЭС $\mathcal{E}_п = 4.406 \cdot 10^8$ кВт·ч
 Мощность силовой установки $N = 9.339 \cdot 10^2$ кВт
 Годовая выработка энергии $\mathcal{E} = 1.498 \cdot 10^8$ кВт·ч/год

Литература

1. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции в современной энергетике. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 271 с.
2. Бернштейн Л.Б. Приливные электростанции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
3. Бернштейн Л.Б. и др. Приливные электростанции /Под ред. Л.Б. Бернштейна. – М.: АО "Институт Гидропроект", 1994. – 568 с.
4. Некрасов А.В. Энергия океанских приливов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.

Работа № 14

Расчет оптимальной глубины выпуска сточных вод в море

Задачи работы

1. Ознакомиться с методами расчета высоты подъема факела хозяйственно-бытовых сточных вод в неподвижной среде и при постоянных течениях.
2. Выбрать оптимальную глубину выпуска сточных вод, при которой исключается поступление загрязнений в поверхностный слой моря.

(В промышленно развитых странах выпуск готовой продукции сопровождается большим количеством отходов) (промышленных, коммунальных, сельскохозяйственных). Полное вторичное использование отходов – задача далекого будущего. Технологические и экономические причины являются основными сдерживающими факторами организации безотходных производств. В связи с этим многие страны практикуют захоронение отходов как на суше, так и в море. Рост антропогенного воздействия на морскую среду приводит главным образом к увеличению скоростей поступления загрязняющих веществ в Мировой океан) как на региональном уровне, так и в глобальном масштабе.

(Расположение выпускных устройств на значительных глубинах способствует образованию затопленных полей сточных вод, не поднимающихся в верхние слои стратифицированного моря с выраженным скачком плотности.) Окисляющая способность морской воды позволяет перерабатывать большое количество органических и неорганических веществ. Гидродинамические процессы в море способствуют рассеиванию и смещению этих веществ, что при разумной организации выпусков стоков в море позволяет не допускать их повышенной и опасной для среды концентрации. .

(В практике сброса сточных вод в море главным является оп-

ределение с океанологических позиций возможности и допустимости сброса. Океанологическое обоснование, без которого сброс хозяйственно-бытовых сточных вод в море недопустим, должно включать [1]:

- проблему допустимой нагрузки данного моря тем или иным объемом сточных вод без нарушения нормального функционирования водоема как сложной системы, т.е. с учетом использования и воспроизводства естественных ресурсов моря;

- океанологические условия сброса, определяющие допустимость и возможность сброса в данном районе на основе исследования закономерностей циркуляции вод, процессов смешения и разбавления, интенсивности минерализации органических веществ, скорости отмирания бактериальной флоры сточных вод, интенсивности биологических процессов самоочищения и др.

(Главная особенность глубоководного сброса - это возможность сочетать естественную очистку за счет таких процессов в океане, как плотностная стратификация, циркуляция и системы течений, процессы турбулентной диффузии и обмена, гидрохимический и биологический режим водоема, и искусственную на современных инженерно-технических устройствах рассеивающих выпуски, предварительного смешения и очистки для достижения рационального переноса, максимального разбавления и наибольшего самоочищения морских вод от загрязнения.

Целесообразность глубоководного и сверхдальнего выпуска определяется рядом условий, из которых главными являются [1]:

- устранение загрязненности прибрежной зоны или всего шельфа данного района (района интенсивного водопользования и водопотребления) и поверхностного слоя;

- эффективная санитарная охрана и сохранение воспроизводства биологических и других ресурсов; наличие благоприятных океанологических условий, допускающих глубоководный сброс;

- технико-экономическая обоснованность.

Оптимальное, с учетом океанологических условий, расположение выпусков хозяйственно-бытовых сточных вод имеет важное значение не только для непосредственного района выпуска, но и для морского бассейна в целом. Глубоководный сброс стоков в море должен быть научно обоснованным и не должен приводить к за-

рязнению района выпуска.)

Загрязнения, попадающие в море со стоками при их глубоководном выпуске, рассеиваются, переносятся течениями и смешиваются с окружающими водами в пределах некоторого слоя, верхняя граница которого может заметно изменять свое положение. (Высота подъема сточных вод в море зависит от их состава, типа выпускного устройства, плотностной стратификации, системы течений и турбулентного обмена в бассейне.)

Определение высоты подъема загрязняющих веществ в стратифицированном море дает возможность рассчитать оптимальную глубину выпуска сточных вод, обеспечивающую их устойчивое затопление в промежуточных слоях, что позволит избежать загрязнения поверхности моря и его прибрежной зоны. Существующие методы расчета высоты подъема факела сточных вод основываются на анализе процессов, происходящих в стратифицированном бассейне.

(По методу Брукса-Коха при постоянном по глубине градиенте плотности в линейно стратифицированном море высота подъема факела сточных вод для линейного источника в неподвижной среде (случай, относящийся к неблагоприятным условиям, поскольку в отсутствие течений высота факела сточных вод максимальна) определяется по эмпирической формуле [2])

$$H_0^3 = \frac{4\mu q_0}{\alpha \sqrt{g}} \frac{\sigma_1 - \sigma_\alpha}{\sqrt{(d\sigma_0/dz)^3}}, \quad (14.1)$$

(а для точечного выпуска используется соотношение Фишера и Брукса:

$$H_0^4 = 6340 \frac{Q_0(\sigma_1 - \sigma_\alpha)}{\sqrt{g} \sqrt{(d\sigma_0/dz)^3}}, \quad (14.2)$$

где μ – безразмерный параметр, принимаемый в пределах значений $2.24 \div 2.96$; α – коэффициент вовлечения окружающей водной массы в поднимающийся факел загрязнений, значение которого изменяется от 0.82 до 0.093; q_0 , Q_0 – расходы сбрасываемой жидкости соответственно на единицу длины линейного и точечного источников, которые принимаются в пределах $0.2 \div 2.0$ м²/с и $0.02 \div 2.0$ м³/с; σ_α , σ_1 и σ_0 – соответственно условные плотности сточных вод, морской воды у места выпуска и на ближайшем от источника горизонте наб-

людений; $d\sigma_0/dz$ – градиент условной плотности у места выпуска.

(В неподвижной воде высота факела сточных вод наибольшая, что создает наименее благоприятные условия для их сброса при существующей стратификации.) В реальных условиях ситуации, в которых течения отсутствуют, практически не встречаются. (Для учета влияния течений на высоту подъема факела сточных вод вводится поправочный коэффициент k , зависящий от скорости течения и определяемый по формулам [1, 2] для случая, когда плотность струи стоков мало отличается от плотности окружающей среды:

$$k=1-0.67u^{0.6}, \quad (14.3)$$

или для некоторого среднего состояния:

$$k=1-0.93u^{0.4}, \quad (14.4)$$

где u – скорость течения, м/с.

(Высота факела сточных вод при наличии течений определяется тогда по формулам [1, 2]

$$H_u=(1-0.67u^{0.6})H_0, \quad (14.5)$$

$$H_u=(1-0.93u^{0.4})H_0. \quad (14.6)$$

Приведенные соотношения хорошо отражают реальную картину затопления струи стоков при больших или очень больших градиентах плотности. При слабых градиентах и при малых расстояниях по вертикали между выпуском и поверхностью или слоем скачка (даже при значительных градиентах плотности) можно получить ошибочное представление о высоте подъема факела сточных вод [2].

Исходные данные

1. Распределение температуры и солености воды по вертикали на гидрологической станции вблизи места сброса сточных вод.
2. Расход сбрасываемых загрязнений на единицу длины линейного источника q_0 ($\text{м}^2/\text{с}$) и от точечного источника Q_0 ($\text{м}^3/\text{с}$).
3. Плотность сточных вод ρ_q ($\text{кг}/\text{м}^3$);
4. Коэффициент вовлечения окружающей жидкости в поднимающийся факел α .
5. Безразмерный параметр высоты факела μ .
6. Допустимая глубина подъема сточных вод H_d (м).

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать значения условной плотности воды по вертикали и ее градиенты.

Значения плотности воды ρ (кг/м^3) у места сброса загрязнений рассчитываются по уравнению Миллера (УС-80) без учета давления

$$\rho = (b_1 + b_2T - b_3T^2 + b_4T^3 - b_5T^4 + b_6T^5 + (b_7 - b_8T + b_9T^2 - b_{10}T^3 + b_{11}T^4)S - (b_{12} - b_{13}T + b_{14}T^2)\sqrt{S^3} + b_{15}S^2,$$

в котором значения коэффициентов b равны:

$$\begin{aligned} b_1 &= 999.842594; & b_2 &= 6.793952 \cdot 10^{-2}; & b_3 &= 9.095290 \cdot 10^{-3}; \\ b_4 &= 1.001685 \cdot 10^{-4}; & b_5 &= 1.120083 \cdot 10^{-6}; & b_6 &= 6.536332 \cdot 10^{-9}; \\ b_7 &= 8.24493 \cdot 10^{-1}; & b_8 &= 4.0899 \cdot 10^{-3}; & b_9 &= 7.6438 \cdot 10^{-5}; \\ b_{10} &= 8.2467 \cdot 10^{-7}; & b_{11} &= 5.3875 \cdot 10^{-9}; & b_{12} &= 5.72466 \cdot 10^{-3}; \\ b_{13} &= 1.0227 \cdot 10^{-4}; & b_{14} &= 1.6546 \cdot 10^{-6}; & b_{15} &= 4.8314 \cdot 10^{-4}; \end{aligned}$$

2. Определить высоты факела сточных вод при данной стратификации в неподвижной среде.

Линейный и точечный источники выпуска сточных вод помещаются на горизонтах наблюдений.

Высоты факела в неподвижной среде определяются по формулам (14.1) и (14.2) с учетом заданных коэффициента вовлечения α и параметра высоты факела μ .

3. Рассчитать толщины верхнего незагрязненного слоя воды выше горизонта выпуска H_0^* (м) при различных глубинах выпуска сточных вод.

Толщины верхнего незагрязненного слоя воды определяется разностью между глубиной выпуска сточных вод H и высотой их факела

$$H_0^* = H - H_0.$$

4. Определить поправочные коэффициенты k для учета течений в месте сброса сточных вод.

Поправочные коэффициенты определяются по формулам (14.3) и (14.4) с учетом средней скорости течения в месте сброса загрязнений.

5. Определить высоты факела сточных вод при данной стратификации и наличии течений в районе выпуска.

Высоты факела при наличии течений определяются по формулам (14.5) и (14.6) с учетом поправочных коэффициентов k .

6. Рассчитать толщины верхнего незагрязненного слоя воды H_u^* (м) при различной глубине выпуска сточных вод H в движущейся среде.

(Толщина верхнего незагрязненного слоя воды также определяется разностью между глубиной выпуска сточных вод и высотой их факела в движущейся среде

$$H_u^* = H - H_u.)$$

7. Определить оптимальную глубину выпуска сточных вод, при которой исключается поступление загрязнений в поверхностный слой моря в неподвижной среде и при наличии течений.

Оптимальная глубина выпуска сточных вод определяется с учетом значения допустимой глубины подъема факела сточных вод H_d .

8. Анализ результатов.

В анализе результатов провести сравнение высот факела сточных вод, рассчитанных по формулам (14.1), (14.2), (14.5) и (14.6), в неподвижной и движущейся средах. Дать характеристику изменения толщин верхнего незагрязненного слоя воды при различных глубинах выпуска сточных вод в спокойной воде и при наличии течений.

Пример выполнения работы

В а р и а н т 31

Исходные данные

$$\begin{aligned} q_0 &= 0.670 \text{ м}^2/\text{с}, & Q_0 &= 0.670 \text{ м}^3/\text{с}, \\ \rho_\alpha &= 1000.000 \text{ кг/м}^3, & u &= 0.53 \text{ м/с}, \\ \alpha &= 0.20, & \mu &= 2.57, \end{aligned}$$

$$k_1 = 0.5422, \quad k_2 = 0.2786.$$

H м	T °C	S ‰	σ_0 усл. ед.	$d\sigma_0/dz$	$\sigma_0 - \sigma_\alpha$
0.0	23.807	16.700	10.1205	-	10.1205
10.0	18.530	17.922	12.3805	$2.260 \cdot 10^{-1}$	12.3805
25.0	15.965	18.700	13.5403	$7.732 \cdot 10^{-2}$	13.5403
75.0	8.000	18.000	14.2500	$1.419 \cdot 10^{-2}$	14.2500
150.0	5.000	19.486	15.7506	$2.001 \cdot 10^{-2}$	15.7506
200.0	4.500	19.987	16.2007	$9.002 \cdot 10^{-3}$	16.2007
500.0	3.000	20.896	17.0507	$2.833 \cdot 10^{-3}$	17.0507

Высота факела в неподвижной среде

H м	$H_{0,1}$ м	$H_{0,2}$ м	$H_{0,1}^*$ м	$H_{0,2}^*$ м
0.0	-	-	-	-
10.0	10.821	18.906	-0.821	-8.906
25.0	19.060	28.267	5.940	-3.267
75.0	45.250	53.375	29.750	21.625
150.0	39.406	46.928	110.594	103.072
200.0	59.303	63.315	140.697	136.685
500.0	107.520	97.671	392.480	402.329

Высота факела в движущейся среде

(расчет по формуле (14.1) при k_1 и k_2).

H м	H_u м	H_u^* м	H_u м	H_u^* м
0.0	-	-	-	-
10.0	5.867	4.133	3.014	6.986
25.0	10.335	14.665	5.310	19.690
75.0	24.536	50.464	12.605	62.395
150.0	21.368	128.632	10.977	139.023
200.0	32.156	167.844	16.520	183.480
500.0	58.302	441.698	29.952	470.048

Высота факела в движущейся среде

(расчет по (14.2) при k_1 и k_2).

H м	H_u м	H_u^* м	H_u м	H_u^* м
0.0	-	-	-	-
10.0	10.251	-0.251	5.267	4.733
25.0	15.327	9.673	7.874	17.126
75.0	28.942	46.058	14.869	60.131
150.0	25.446	124.554	13.073	136.927
200.0	34.332	165.668	17.638	182.362
500.0	52.961	447.039	27.208	472.792

Литература

1. Зац В.И. Некоторые результаты океанографических исследований допустимости и оптимальных параметров глубоководного сброса сточных вод в Черное море. – В кн.: Биология моря. Киев: Наукова Думка, 1972, с. 111-123.
2. Зац В.И. Об устойчивости затопления полей сточных вод в промежуточном слое стратифицированного моря. – Водные ресурсы, 1975, № 1, с. 180-191.

В а р и а н т ы

ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Работа № 1

Вариант 1

о. Сахалин, м. Терпения

Январь Октябрь

Вариант 2

о. Сахалин, м. Терпения

Февраль Ноябрь

Вариант 3

о. Сахалин, м. Терпения

Март Декабрь

Вариант 4

о. Сахалин, п. Корсаков

Январь Сентябрь

Вариант 5

о. Сахалин, п. Корсаков

Февраль Октябрь

Вариант 6

о. Сахалин, п. Корсаков

Март Ноябрь

Вариант 7

о. Сахалин, п. Чайво

Январь Сентябрь

Вариант 8

о. Сахалин, п. Чайво

Февраль Октябрь

Вариант 9

о. Сахалин, п. Чайво

Март Ноябрь

Вариант 10

о. Сахалин, п. Поронайск

Январь Сентябрь

Вариант 11

о. Сахалин, п. Поронайск

Февраль Октябрь

Вариант 12

о. Сахалин, п. Поронайск

Март Ноябрь

Вариант 13

п-ов Камчатка, п. Корф

Январь Сентябрь

Вариант 14

п-ов Камчатка, п. Корф

Февраль Октябрь

Вариант 15

п-ов Камчатка, п. Корф

Март Ноябрь

Вариант 16

п-ов Камчатка, п. Усть-Камчатск

Январь Август

Вариант 17

п-ов Камчатка, п. Усть-Камчатск

Март Октябрь

Вариант 18

п-ов Камчатка, п. Усть-Камчатск

Февраль Сентябрь

Вариант 19

п-ов Камчатка, п. Усть-Хайрюзово

Январь Август

Вариант 20

п-ов Камчатка, п. Усть-Хайрюзово

Февраль Сентябрь

Вариант 21

п-ов Камчатка, п. Усть-Хайрюзово

Март Октябрь

Вариант 22

о. Симушир, зал. Мильна

Январь Август

Вариант 23

о. Симушир, зал. Мильна

Февраль Сентябрь

Вариант 24

о. Симушир, зал. Мильна

Март Октябрь

Вариант 25

о. Симушир, бух. Мельника

Апрель Ноябрь

Вариант 26

о. Симушир, бух. Мельника

Май Июль

Вариант 27

о. Симушир, бух. Мельника

Июнь Декабрь

Вариант 28

о. Симушир, п. Курильск

Январь Август

Вариант 29

о. Симушир, п. Курильск

Февраль Сентябрь

Вариант 30

о. Симушир, п. Курильск

Март Октябрь

Работа № 5

$K = 16 \text{ МН/м}$; $C_{\text{ск}} = 1.0$; $C_{\text{ин}} = 2.0$; $C = 4.20 \cdot 10^5 \text{ кг/с}$; $\omega t = 6.0$

Глубина моря у сооружения и параметры волн
из выполненных ранее работ.

№ варианта	D_1	d_1	D_2	d_2	G_1	G_2
1	0.73	0.08	0.65	0.07	210	210
2	0.89	0.08	0.73	0.08	220	205
3	0.89	0.08	0.73	0.08	230	210
4	1.14	0.08	0.89	0.08	240	215
5	1.46	0.09	1.14	0.08	245	220
6	1.68	0.10	1.46	0.09	250	230
7	1.68	0.10	1.14	0.08	248	225
8	2.19	0.11	1.14	0.08	260	245
9	2.19	0.11	1.46	0.09	270	250
10	2.19	0.11	1.68	0.10	275	255
11	2.19	0.11	2.19	0.11	285	260
12	2.73	0.11	1.14	0.08	290	265
13	2.73	0.11	1.46	0.09	295	265
14	2.73	0.11	2.19	0.10	300	280
15	1.22	0.12	0.61	0.12	230	220
16	1.46	0.08	0.89	0.08	250	220
17	2.85	0.12	1.95	0.10	310	290
18	2.19	0.11	1.68	0.10	301	275
19	0.89	0.08	0.73	0.08	296	289
20	1.20	0.12	0.60	0.10	230	220
21	2.44	0.11	1.19	0.10	247	238
22	2.25	0.10	0.92	0.09	225	217
23	2.29	0.10	1.01	0.09	232	228
24	2.31	0.11	1.31	0.09	242	258
25	2.41	0.11	1.35	0.09	257	248
26	1.73	0.12	0.65	0.10	510	410
27	1.89	0.10	0.73	0.08	420	305
28	2.89	0.11	0.93	0.10	430	310
29	2.14	0.12	1.11	0.08	540	415
30	2.46	0.13	1.14	0.10	545	420

D_1, d_1 – диаметр и толщина стенок вертикальных колонн, м;

D_2, d_2 – диаметр и толщина стенок наклонных и горизонтальных
элементов сооружения, м;

G_1, G_2 – масса платформы и основания сооружения, т.

Работа № 7

Вариант 1

о. Уруп, бух. Океанская

$$h_{100} = 15 \quad T = 12 \quad h_{10} = 6$$

Вариант 2

бух. Китова

$$h_{100} = 13.5 \quad T = 14 \quad h_{10} = 14.9$$

Вариант 3

бух. Чайкины

$$h_{100} = 6 \quad T = 12 \quad h_{10} = 3.7$$

Вариант 4

зал. Яушч

$$h_{100} = 7 \quad T = 12 \quad h_{10} = 5.7$$

Вариант 5

о. Симушир, бух. Душная

$$h_{100} = 8.6 \quad T = 6 \quad h_{10} = 6.8$$

Вариант 6

о. Матуа

$$h_{100} = 9.9 \quad T = 9 \quad h_{10} = 6$$

Вариант 7

о. Итуруп, м. Плавный

$$h_{100} = 7.6 \quad T = 12 \quad h_{10} = 6.7$$

Вариант 8

о. Парамушир, п. Северо-Курильск

$$h_{100} = 7.8 \quad T = 15 \quad h_{10} = 4.9$$

Вариант 9

о. Итуруп, м. Буревестник

$$h_{100} = 7.6 \quad T = 12 \quad h_{10} = 5.8$$

Вариант 10

о. Парамушир, п. Северо-Курильск

$$h_{100} = 7.8 \quad T = 15 \quad h_{10} = 5.5$$

Вариант 11

о. Онекотан, м. Зеленый

$$h_{100} = 10.5 \quad T = 12 \quad h_{10} = 7.9$$

Вариант 12

о. Шумшу, м. Большой

$$h_{100} = 6 \quad T = 14 \quad h_{10} = 3.4$$

Вариант 13

п-ов Камчатка, м. Сенявина

$$h_{100} = 10.8 \quad T = 12 \quad h_{10} = 6.7$$

Вариант 14

п-ов Камчатка, м. Лопатка

$$h_{100} = 8.1 \quad T = 12 \quad h_{10} = 5.2$$

Вариант 15

о. Сахалин, м. Сенявина

$$h_{100} = 10 \quad T = 11 \quad h_{10} = 6.8$$

Вариант 16

о. Итуруп, м. Тоннельный

$$h_{100} = 7 \quad T = 12 \quad h_{10} = 4.2$$

Вариант 17

п. Петропавловск-Камчатский

$$h_{100} = 2.3 \quad T = 15 \quad h_{10} = 1.1$$

Вариант 18

о. Сахалин, п. Корсаков

$$h_{100} = 2.8 \quad T = 11 \quad h_{10} = 1.1$$

Вариант 19

о. Матуа

$$h_{100} = 9.9 \quad T = 9 \quad h_{10} = 5.6$$

Вариант 20

о. Шикотан

$$h_{100} = 13.6 \quad T = 10 \quad h_{10} = 7.9$$

Вариант 21

о. Онекотан, м. Зеленый

$$h_{100} = 11.9 \quad T = 10 \quad h_{10} = 6.7$$

Вариант 22

о. Симушир, бух. Спасения

$$h_{100} = 8.6 \quad T = 9 \quad h_{10} = 4.7$$

Вариант 23

о. Парамушир, м. Васильево

$$h_{100} = 11 \quad T = 12 \quad h_{10} = 6.8$$

Вариант 24

о. Парамушир, п. Северо-Курильск

$$h_{100} = 7.8 \quad T = 15 \quad h_{10} = 3.9$$

Вариант 25

о. Шикотан, бух. Церковная

$$h_{100} = 13.8 \quad T = 14 \quad h_{10} = 7.9$$

Вариант 26

о. Парамушир, м. Васильева

$$h_{100} = 11 \quad T = 7 \quad h_{10} = 7.2$$

Вариант 27

о. Шумшу, м. Бабушкина

$$h_{100} = 9.8 \quad T = 10 \quad h_{10} = 5.6$$

Вариант 28

о. Онекотан, бух. Паганель

$$h_{100} = 12.9 \quad T = 11 \quad h_{10} = 6.8$$

Вариант 29

о. Итуруп, м. Буревестник

$$h_{100} = 7.6 \quad T = 11 \quad h_{10} = 3.6$$

Вариант 30

о. Симушир, м. Крепкий

$$h_{100} = 8.6 \quad T = 9 \quad h_{10} = 5.5$$

h_{100} — высота волны, м; T — период, мин; h_{10} — высота волны, м.

Работа № 8*

Вариант 1 N=49			Вариант 2 N=42			Вариант 3 N=47			Вариант 4 N=49		
1029	1034	1019	1029	1034	1034	1348	1213	1467	1018	1025	1021
101	116	79	99	114	117	87	63	110	109	74	64
80	82	13	82	80	83	69	78	121	80	110	79
86	114	144	83	116	115	97	54	86	111	93	57
88	113	111	91	115	114	87	66	98	110	94	69
94	97	96	92	95	98	-99	78	103	93	97	79
98	110	102	100	112	111	98	74	90	108	118	80
99	113	97	96	110	114	105	-99	97	106	65	59
64	93	98	61	96	94	83	58	88	94	123	92
95	123	109	98	126	124	100	88	83	109	116	108
101	105	142	104	102	105	-99	107	94	126	128	66
75	107	116	73	107	108	89	62	79	143	87	-99
73	142	84	71	142	143	77	65	85	114	89	63
151	92	104	153	92	93	74	74	106	104	84	133
134	99	108	136	99	100	97	61	69	97	99	62
89	109	95	86	105	110	93	60	94	113	98	140
115	88	98	112	84	89	75	69	105	98	134	70
69	72	69	72	76	73	-99	90	88	80	105	92
101	154	89	104	158	145	91	84	82	144	73	85
98	142	120	95	143	142	90	52	89	128	93	53
75	110	117	78	109	111	86	85	77	106	96	87
98	125	102	96	123	126	72	83	88	96	85	88
130	120	135	132	122	121	103	67	80	93	106	69
79	135	77	76	133	136	77	82	87	103	85	83
82	96	104	85	98	96	81	53	78	86	56	55
77	108	107	75	110	109	77	58	88	113	119	98
88	110	87	90	115	111	82	65	90	106	79	67
75	107	96	72	102	108	68	73	82	106	111	66
87	107	141	92	109	105	82	64	99	115	103	142
99	102	149	97	100	103	91	92	87	122	93	74
84	97	137	86	95	98	63	68	97	100	127	65
104	108	132	103	106	109	106	46	99	117	64	-99
101	89	141	102	91	90	74	79	100	86	92	69
73	95	117	75	97	96	-99	52	95	94	98	47
78	120	124	76	118	121	73	71	88	91	104	80
116	79	106	118	81	80	81	72	80	115	121	53
82	108	102	80	106	109	73	92	77	116	77	72
87	115	130	89	117	116	-99	71	81	93	128	124
82	111	110	80	114	99	102	115	81	107	141	92
85	101	95	87	80	82	88	48	76	103	122	116
63	85	118	61	117	83	61	92	84	89	125	91
106	78	96	104	116	91	79	-99	76	120	116	146
80	92	93	82	95	92	81	71	105	124	108	149
87	65	114				100	49	99	118	112	72
89	102	80				80	90	110	120	97	70
93	110	106				74	52	86	87	89	120
100	115	113				69	96	74	90	119	122
111	132	104				67	87	90	114	103	141
108	123	95							118	86	85
98	118	102							97	88	87

* - Максимумы отклонения уровня -99 означают пропуски наблюдений.

Вариант 5			Вариант 6			Вариант 7			Вариант 8		
N=51			N=45			N=45			N=43		
1024	1020	1022	1035	1028	1020	1017	1027	1027	1019	1018	1020
82	76	87	87	88	71	108	109	86	72	107	69
89	87	98	70	109	89	77	122	67	108	78	87
106	110	117	98	81	64	110	85	95	90	109	62
103	104	114	90	96	77	107	99	89	93	108	75
111	121	125	90	108	88	92	104	87	97	91	86
79	70	83	99	105	85	105	89	96	118	106	83
100	97	110	106	86	68	105	98	103	65	104	66
101	102	112	84	123	100	91	87	81	123	92	98
100	96	109	101	142	117	108	84	100	135	107	115
98	96	108	70	91	73	123	93	67	98	124	71
129	122	137	78	95	81	142	80	75	87	141	75
83	78	88	75	107	77	111	84	74	89	112	85
96	95	108	98	89	69	103	107	95	84	102	69
85	84	90	94	90	72	94	68	55	99	95	70
95	94	105	76	96	79	114	95	91	98	113	77
94	93	103	92	124	101	95	104	73	133	96	99
104	106	105	91	102	94	77	89	89	103	78	92
91	92	100	87	107	65	143	81	88	71	142	63
68	51	66	73	117	96	127	88	79	95	126	94
100	102	111	104	97	95	103	76	84	96	104	93
89	86	95	76	114	78	100	87	70	85	101	76
105	107	116	82	113	79	101	81	101	85	84	78
89	86	94	76	113	93	102	88	73	56	111	91
90	90	98	81	112	91	100	77	81	80	104	89
111	118	123	69	129	70	83	89	80	111	104	77
85	84	90	81	104	109	112	89	78	103	113	92
92	93	102	91	109	128	103	81	68	94	120	109
77	66	81	63	144	99	103	87	78	127	98	126
96	94	105	107	82	69	114	98	89	63	115	97
84	82	90	75	99	82	119	81	60	91	84	67
78	68	82	74	107	100	97	98	104	98	92	80
81	74	85	82	113	83	114	82	72	74	89	98
83	79	88	73	79	65	83	101	71	77	112	81
83	76	88	102	89	127	91	96	88	128	108	63
110	113	119	77	145	113	88	87	70	140	90	127
89	86	94	56	111	91	111	79	99	122	106	111
76	65	78	88	125	88	109	76	74	125	105	89
81	76	86	62	124	71	89	82	72	115	101	86
88	85	94	80	135	98	107	80	85	118	87	69
73	62	72	82	100	91	104	75	59	108	118	96
81	75	86	101	112	91	102	83	78	111	115	89
79	72	83	81	117	100	86	75	64	79	69	89
82	76	87	124	104	139	117	104	98	112	116	98
78	70	82	57	111	102	117	100	78			
83	80	89	100	110	103	118	111	121			
78	68	81									
77	66	80									
89	87	97									
75	62	78									
69	52	68									
77	65	79									

Вариант 9			Вариант 10			Вариант 11			Вариант 12		
N=48			N=45			N=40			N=46		
1019	1017	1014	1023	1021	1019	1018	1022	1027	1025	1035	1025
131	126	128	68	83	71	73	97	93	116	96	115
142	137	138	104	66	106	97	89	100	131	104	133
110	104	107	91	93	91	64	119	78	126	102	128
141	134	137	90	87	92	82	101	95	123	99	125
137	133	136	93	112	92	96	86	64	133	105	135
104	98	100	114	95	116	92	105	72	113	96	111
132	128	131	65	102	63	70	83	69	117	97	118
107	101	104	122	81	121	113	84	92	96	82	98
120	114	115	131	97	133	136	101	88	116	97	118
141	136	137	95	67	96	76	71	70	120	98	122
117	113	114	83	75	85	95	97	86	109	92	111
116	102	112	67	101	70	95	84	70	97	85	99
149	145	149	92	72	93	96	91	75	96	85	98
109	103	105	93	112	93	70	93	63	138	122	140
87	82	84	81	72	82	100	106	75	72	68	74
89	83	84	56	78	54	83	85	85	75	68	77
106	101	103	57	66	78	84	81	57	83	72	84
130	124	126	76	89	109	92	103	101	78	71	80
106	101	102	100	88	101	93	82	69	96	80	98
108	102	104	98	59	92	101	98	68	95	80	97
117	112	114	91	103	125	62	108	76	87	74	90
102	97	100	118	71	61	99	113	67	94	79	96
79	73	75	63	71	89	74	93	96	83	73	85
104	99	101	87	80	96	72	81	71	121	99	123
95	88	89	94	69	72	154	69	50	93	79	95
98	97	98	70	99	75	87	86	82	92	79	95
111	108	110	73	74	126	113	89	56	106	89	108
98	97	98	123	52	138	73	85	74	109	90	109
80	76	80	136	84	121	105	91	76	90	76	93
93	86	88	5	58	9	96	92	95	101	88	103
97	96	94	122	76	117	115	97	75	87	74	89
96	91	92	111	78	116	116	120	118	63	60	65
104	100	102	114	97	107	117	90	52	61	55	63
118	113	115	105	77	105	113	117	95	85	74	87
69	62	65	107	118	106				69	61	71
95	91	91	93	53	97				89	75	91
102	98	100	84	96	84				82	71	84
135	130	132	115	95	82				84	73	87
95	88	90	82	81	101				70	67	72
84	80	83							54	54	56
77	72	73									
96	93	92									

Вариант 13			Вариант 14			Вариант 15			Вариант 16		
N=46			N=46			N=42			N=51		
1023	1020	1021	1030	1025	1031	1027	1025	1026	1024	1020	1022
62	59	60	70	68	74	93	91	96	75	76	125
79	76	78	88	86	92	129	127	129	96	102	137
55	51	52	63	60	65	73	71	77	68	62	119
67	66	66	76	73	78	82	80	84	83	94	123
79	75	77	87	84	83	72	69	73	95	85	112
76	73	74	84	81	83	69	66	71	92	68	115
59	55	57	67	65	69	89	86	93	73	86	105
91	87	89	99	97	101	94	93	95	110	122	108
107	104	105	116	115	118	83	81	84	129	66	94
64	61	62	72	70	74	100	98	103	78	75	86
66	63	64	74	71	76	101	98	102	82	65	116
76	73	74	84	83	86	72	70	69	94	80	98
63	60	60	70	67	73	73	71	75	76	62	83
64	59	61	71	68	73	115	113	116	77	82	102
69	66	68	78	78	80	77	75	79	85	90	80
92	88	90	100	98	101	86	85	87	111	76	81
85	81	83	93	92	95	77	75	76	103	93	98
54	49	52	62	61	63	84	82	87	69	92	68
87	83	85	95	93	97	56	57	61	105	65	94
86	82	84	94	90	96	101	98	104	104	66	97
69	65	67	77	75	79	79	76	83	84	118	87
83	79	81	91	88	93	100	97	103	89	70	85
55	51	53	63	61	65	114	113	115	81	79	90
100	95	97	107	105	109	91	88	93	88	70	72
67	63	65	75	73	77	84	83	85	79	78	88
66	62	64	74	72	75	81	77	82	89	51	81
72	71	72	82	81	83	75	74	77	91	94	88
65	61	63	73	71	75	100	102	101	83	72	90
94	91	92	102	100	103	83	81	82	100	87	103
69	65	67	77	75	79	59	57	56	83	107	82
48	44	46	56	55	57	98	96	99	98	84	78
80	76	78	88	83	89	101	98	102	100	76	100
51	51	52	62	61	62	93	91	95	101	74	79
72	68	70	80	79	82	104	101	106	96	68	95
74	71	72	82	81	83	109	106	110	89	93	105
93	90	91	101	100	102	93	95	94	81	76	110
73	70	71	81	79	83	126	124	127	78	52	90
116	112	114	124	121	118	104	101	105	82	95	78
51	46	48	58	56	59	120	118	121	77	97	66
93	89	91	101	99	104	118	116	120	85	86	83
95	90	92	102	100	105	117	115	119	77	96	86
89	91	91	103	101	106	119	116	120	106	102	82
91	87	89	99	97	101				100	86	88
83	85	85	98	96	100				111	121	89
66	62	64	74	71	76				83	96	94
69	65	67	77	75	79				90	113	117
									78	111	87
									79	110	114
									81	108	108
									80	106	111
									79	104	109

Вариант 17			Вариант 18			Вариант 19			Вариант 20		
N=41			N=48			N=42			N=48		
1025	1027	1024	1017	1014	1019	1029	1034	1034	1019	1034	1025
74	76	73	80	84	79	101	114	117	79	116	74
83	85	81	133	136	131	80	80	83	131	82	110
66	69	65	145	149	144	86	116	115	144	114	93
79	83	77	113	115	111	88	115	114	111	113	94
91	94	89	98	100	96	94	95	98	96	97	97
88	91	87	104	107	102	98	112	111	102	110	118
72	76	71	100	103	97	99	110	114	97	113	65
102	104	100	98	101	98	64	96	94	98	93	123
120	123	119	112	114	109	95	126	124	109	123	115
76	79	74	134	138	142	101	102	105	142	105	98
80	84	79	108	112	116	75	107	108	116	107	87
91	93	89	76	80	84	73	142	143	84	142	89
75	78	73	96	100	104	151	92	93	104	92	84
74	76	73	101	104	108	134	99	100	108	99	99
83	85	81	88	91	95	89	105	110	95	109	98
104	105	103	93	94	98	115	84	89	98	88	134
96	98	95	62	65	69	69	76	73	69	72	105
69	73	67	83	85	89	101	158	145	89	154	73
99	102	97	113	115	120	98	143	142	120	142	93
97	99	95	112	114	117	75	109	111	117	110	96
82	83	81	97	98	102	98	123	126	102	125	85
97	99	95	128	131	135	130	122	121	135	120	83
95	97	94	72	73	77	79	133	136	77	135	85
81	82	79	98	100	104	82	98	96	104	96	56
98	101	96	102	104	107	77	110	109	107	108	66
103	106	101	82	84	87	88	115	111	87	110	79
120	121	118	91	92	96	75	102	108	96	107	111
98	101	97	136	137	141	87	109	105	141	107	103
73	75	72	143	145	149	99	100	103	149	102	93
85	86	83	130	132	137	84	95	98	137	97	127
103	105	103	126	128	132	104	106	109	132	108	64
87	89	87	137	137	141	101	91	90	141	89	92
69	71	70	123	113	117	73	97	96	117	95	98
72	81	80	118	120	124	78	118	121	124	120	92
109	110	118	101	102	106	116	81	80	106	79	95
95	97	95	97	98	102	82	106	109	102	108	77
91	93	91	124	126	130	87	117	116	130	115	128
75	77	75	103	105	110	82	114	99	110	111	141
102	103	101	88	90	95	85	80	82	95	101	122
95	96	95	112	114	118	63	117	83	118	85	125
95	97	96	91	92	96	106	116	91	96	78	116
			87	89	93	80	95	92	93	92	108
			108	110	114				114	65	112
			73	75	80				80	102	97
			101	102	106				106	110	89
			99	100	113				113	115	119
			98	91	104				104	132	103
			97	89	95				95	123	86

Вариант 21			Вариант 22			Вариант 23			Вариант 24		
N=42			N=46			N=46			N=49		
1027	1029	1029	1031	1033	1032	1021	1023	1020	1029	1025	1022
98	101	99	75	77	74	60	63	61	101	74	125
84	80	82	99	102	98	78	80	76	80	110	137
82	86	83	66	68	64	53	55	51	86	93	119
89	88	91	83	85	81	66	68	64	88	94	123
93	94	92	98	100	97	77	79	75	94	97	112
97	98	100	94	96	92	74	77	73	98	118	115
96	99	96	75	77	73	57	58	54	99	65	105
68	64	61	116	102	114	89	91	87	64	123	108
93	95	98	126	120	124	106	107	104	95	-99	94
98	101	104	77	79	75	62	64	61	101	-99	86
73	75	73	87	89	85	64	65	63	75	87	116
71	73	71	97	99	95	74	76	73	73	89	98
145	151	153	75	77	73	60	61	59	151	84	83
140	134	136	77	79	75	61	69	60	134	99	102
132	89	86	86	88	84	68	92	66	89	98	80
87	115	112	121	123	120	90	85	88	115	134	81
116	69	72	120	122	119	83	53	81	69	105	98
67	101	104	69	71	67	52	86	51	101	73	68
98	98	95	97	99	95	85	86	84	98	93	94
99	75	78	99	101	97	84	69	83	75	96	97
115	98	96	73	75	71	67	83	66	98	85	87
128	130	132	102	103	101	81	54	80	130	-99	85
77	79	76	85	87	83	53	99	52	79	85	90
80	82	85	86	88	84	97	67	96	82	56	72
76	77	75	93	95	91	65	67	63	77	-99	88
87	88	90	94	96	93	64	73	63	88	79	81
73	75	72	103	105	101	72	64	71	75	111	88
72	87	92	101	103	100	63	93	62	87	103	90
85	99	97	64	67	63	92	69	93	99	93	103
97	84	86	99	99	97	67	48	64	84	127	82
82	104	103	101	102	86	46	79	44	104	64	78
102	101	102	76	77	75	78	54	77	101	92	100
98	73	75	74	76	73	52	72	51	73	98	79
71	78	76	143	140	141	70	74	69	78	-99	95
76	116	118	141	139	138	72	93	70	116	-99	105
114	82	80	89	87	87	91	74	89	82	77	110
80	87	89	111	112	108	71	110	70	87	128	90
82	82	80	75	77	73	114	51	112	82	141	78
84	85	87	106	107	104	48	93	90	85	122	66
62	63	61	98	99	97	91	93	91	63	125	83
104	106	104	97	99	95	92	92	92	106	116	86
79	80	82	96	98	94	91	89	91	80	108	82
			111	114	110	89	87	90	87	112	88
			112	113	111	89	66	88	89	97	89
			119	120	117	64	69	65	93	89	94
			114	115	113	67	63	62	100	119	117
									111	103	87
									108	86	114
									98	88	108

Вариант 25			Вариант 26			Вариант 27			Вариант 28		
N=46			N=46			N=41			N=42		
1031	1023	1031	1023	1020	1021	1034	1036	1035	1027	1025	1026
75	63	74	62	69	60	101	105	98	93	91	96
99	80	92	79	76	78	137	141	134	129	127	129
66	55	65	55	51	52	83	87	81	73	71	77
83	68	78	67	66	66	90	91	88	82	80	84
98	79	83	79	75	77	80	83	85	72	69	73
94	77	83	76	73	74	95	97	99	69	66	71
75	58	69	59	55	57	77	79	77	89	86	93
116	91	101	91	87	89	96	98	96	94	93	95
126	107	118	107	104	105	103	105	103	83	81	84
77	64	74	64	61	62	92	94	92	100	98	103
87	65	76	66	63	64	107	109	106	101	98	102
97	76	86	76	73	74	106	108	105	72	70	88
75	61	73	63	60	60	80	83	82	73	71	75
77	69	73	64	59	61	91	94	93	115	113	116
86	92	80	69	66	68	110	113	111	77	75	79
121	85	101	92	88	90	85	87	85	86	85	87
120	53	95	85	81	83	93	95	93	77	75	79
69	86	63	54	49	52	84	86	84	84	82	87
97	86	97	87	83	85	93	95	93	58	57	61
99	69	96	86	82	84	67	69	67	101	98	104
73	83	79	69	65	67	108	111	109	79	76	83
102	54	93	83	79	81	89	92	91	100	97	103
85	99	65	55	51	53	109	112	110	114	113	115
86	67	109	100	95	97	120	121	120	91	88	93
93	67	77	67	63	65	91	94	92	84	83	85
94	73	75	66	62	64	92	95	96	81	77	82
103	64	83	72	71	72	89	91	89	75	74	77
101	93	75	65	61	63	83	85	83	100	77	101
64	69	103	94	91	92	107	109	107	83	81	82
99	48	79	69	65	67	91	93	87	59	57	91
101	79	57	48	44	46	68	70	69	98	96	99
76	54	89	80	76	78	109	111	109	101	98	102
74	72	62	78	51	52	110	112	110	93	91	95
143	74	82	72	68	70	101	103	101	104	101	106
141	93	83	74	71	72	110	112	109	109	106	110
89	74	102	93	90	91	116	118	115	93	115	94
111	110	83	73	70	71	101	103	101	126	124	127
75	51	118	116	112	114	122	123	121	104	101	105
106	93	59	51	46	48	113	114	112	120	118	121
98	93	104	93	89	91	117	116	114	119	116	120
97	92	105	95	90	92	121	119	116	117	115	119
96	89	106	93	91	90				119	116	120
111	87	101	91	87	89						
112	66	100	75	85	76						
119	69	76	66	62	64						
114	63	79	69	65	67						

Вариант 29*N=46*

1039	1040	1038
81	83	79
97	99	95
72	75	71
87	89	85
78	80	76
93	95	91
76	78	79
100	102	99
125	123	120
83	85	81
83	86	81
85	87	82
81	84	80
80	85	78
89	93	87
99	102	92
104	106	95
73	75	77
104	106	103
103	105	102
88	89	87
100	102	98
74	76	72
116	118	114
84	86	82
85	87	85
93	95	91
84	86	82
111	113	109
88	89	86
65	67	63
99	103	97
73	74	74
91	90	90
93	94	91
110	114	108
92	93	91
113	115	111
67	68	65
110	112	108
113	115	111
112	114	108
108	110	106
107	109	104
85	87	83
86	87	85

Вариант 30*N=41*

1019	1021	1024
64	76	67
82	97	91
57	69	58
70	84	76
81	96	90
78	93	86
61	74	64
93	111	107
110	130	130
66	79	70
70	83	75
80	95	89
64	77	67
65	78	69
72	86	78
94	112	116
87	104	116
58	70	61
89	106	89
88	105	90
71	85	64
86	102	94
84	100	77
72	86	78
87	116	86
104	92	87
121	97	95
92	132	91
62	72	56
75	89	93
93	95	99
76	74	68
58	66	66
122	148	148
106	133	131
84	99	81
81	113	107
64	112	67
91	123	99
84	88	90
84	100	73

Работа № 9

№ варианта	Повторяемость ветра по градациям скорости									
	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	21-24	25-28	29-34	34-39
1	0.7	3.8	6.3	6.1	4.0	1.6	0.4	0.6	0.14	0.2
2	4.9	9.3	10.7	6.8	2.6	0.8	0.1	0.03	0.1	0.03
3	0.6	0.5	0.3	0.1	0.2	0.06				
4	0.9	2.1	0.9	0.7	0.3	0.04	0.04			
5	1.3	2.6	2.7	1.7	1.3	0.3	0.1			
6	2.4	4.5	4.1	2.6	4.6	8.8	0.8	0.7	0.7	0.4
7	0.3	1.7	5.8	6.1	4.2	1.9	0.4	0.1	0.04	
8	1.2	1.5	2.1	1.6	1.3	0.7	0.1	0.0	0.05	
9	0.04	0.07	0.13	0.16	0.25	0.22	0.06	0.02	0.02	0.005
10	1.3	5.0	3.9	0.9	0.1	0.03				
11	5.4	6.7	5.7	3.4	2.5	1.0	0.1	0.2		
12	0.9	2.1	0.9	0.7	0.3	0.04	0.04			
13	0.3	1.7	5.8	6.1	4.2	1.9	0.4	0.1	0.04	
14	0.5	2.3	3.9	3.7	3.6	1.6	0.5	0.08	0.08	
15	1.2	5.4	8.1	14.3	8.6	3.4	1.2	0.2	0.2	
16	2.1	7.3	10.1	8.8	5.9	1.8	0.27	0.0	0.2	
17	2.7	8.6	7.9	5.5	2.1	1.4	0.24	0.2	0.2	
18	1.5	4.2	5.3	2.9	2.4	1.2	0.1	0.08	0.07	
19	0.2	3.1	4.9	5.3	4.9	2.4	1.1	0.5	0.2	
20	0.7	3.4	8.0	9.4	7.8	3.2	0.66	0.4	0.3	
21	2.4	3.6	4.1	5.9	4.6	3.2	0.5	0.07	0.07	0.1
22	2.3	2.4	4.9	6.0	4.9	2.5	0.5	0.07	0.27	0.1
23	2.3	2.5	4.9	6.2	5.4	1.9	0.5	0.4	0.34	
24	4.9	3.5	5.7	5.4	2.9	3.8	1.3	0.5	0.07	0.2
25	2.8	4.4	4.4	4.9	3.6	2.0	0.7	0.2	0.15	0.4
26	8.2	3.4	4.5	3.2	2.4	2.7	0.6	0.3	0.3	0.34
27	1.0	3.8	6.4	7.6	7.5	3.2	0.8	0.4	0.07	0.2
28	1.1	1.7	4.2	6.3	5.0	2.0	0.4	0.6	0.2	0.12
29	3.9	10.7	11.7	6.3	2.3	1.3	0.1	0.12	0.2	
30	3.1	7.5	5.9	6.4	4.8	3.0	0.6	0.4	1.0	0.4

Работа № 10

$h_{\text{л}}$ — максимальная толщина льда, м;

$h_{\text{с}}$ — минимальная толщина снега, м;

S — соленость воды, ‰;

L — размеры (длина-ширина) ледяного поля, м × м;

$v_{\text{л}}$ — скорость движения ледяного поля, м/с;

u_{max} — скорость течения подо льдом, м/с;

W_{max} — максимальная скорость ветра, м/с;

W_m — средняя скорость ветра, м/с;

l — ширина секции сооружения по фронту действия льда, м;

b — ширина (диаметр) опоры сооружения, м;

ξ_d — скорость понижения или повышения уровня воды, м/ч;

τ_d — время деформации ледяного поля, ч.

№ варианта	$h_{\text{л}}$	$h_{\text{с}}$	S	L	$v_{\text{л}}$	u_{max}	W_{max}	W_m	l	b	ξ_d	τ_d
1	63	26	9	290×120	0.15	0.6	20.0	7.6	30	5	0.050	8
2	97	37	9	280×210	0.2	0.8	25.0	8.5	25	5	0.052	6
3	91	26	9	270×190	0.2	0.6	20.0	7.6	25	4	0.058	6
4	99	28	9	265×180	0.1	0.4	18.0	6.4	25	4	0.065	8
5	87	40	9	250×175	0.1	0.5	19.0	6.8	25	4	0.054	7
6	100	41	9	345×270	0.1	0.4	15.0	5.3	25	5	0.054	7
7	75	30	9	250×250	0.1	0.3	10.0	3.8	25	6	0.053	8
8	60	20	9	390×300	0.1	0.4	12.0	4.0	25	6	0.062	9
9	88	44	9	400×300	0.15	0.45	19.5	7.0	25	4	0.065	7
10	59	31	9	497×280	0.1	0.3	18.0	6.5	25	4	0.066	8
11	75	40	9	445×230	0.15	0.4	19.0	7.0	25	4	0.065	7
12	56	25	9	455×240	0.15	0.4	25.0	8.0	25	4	0.053	7
13	75	35	9	475×245	0.12	0.37	24.0	7.6	25	5	0.056	6
14	78	23	9	395×270	0.09	0.41	23.0	7.8	30	5	0.055	6
15	98	34	9	480×270	0.1	0.35	22.0	6.4	30	5	0.065	6
16	86	32	9	400×330	0.11	0.3	26.0	11.0	25	6	0.044	6
17	67	35	9	420×290	0.15	0.25	16.0	5.5	25	5	0.040	7
18	72	24	9	400×310	0.1	0.25	17.0	6.2	25	5	0.059	7
19	89	32	9	485×275	0.25	0.45	22.0	10.5	25	5	0.050	6

№ варианта	$h_{\text{л}}$	$h_{\text{с}}$	S	L	$\nu_{\text{л}}$	u_{max}	W_{max}	W_m	l	b	ξ_d	τ_d
20	77	26	9	480×265	0.1	0.3	19.5	7.2	25	6	0.043	6
21	78	23	9	495×270	0.15	0.4	20.0	7.6	25	6	0.043	7
22	71	35	9	480×250	0.1	0.3	19.5	6.8	25	4	0.043	9
23	56	32	9	490×275	0.13	0.35	18.7	6.5	30	4	0.032	6
24	44	38	9	495×280	0.15	0.4	17.9	6.1	30	4	0.041	6
25	96	31	9	345×270	0.1	0.4	15.0	5.3	30	4	0.051	6
26	77	32	9	250×250	0.1	0.3	10.0	3.8	30	5	0.043	6
27	63	26	9	390×300	0.1	0.4	12.0	4.0	30	5	0.043	9
28	80	24	9	400×300	0.15	0.45	19.5	7.0	30	5	0.053	7
29	68	41	9	497×280	0.1	0.3	18.0	6.5	30	5	0.045	8
30	77	40	9	445×230	0.15	0.4	19.0	7.0	30	5	0.046	7

Работа № 11

$h_{\text{л}}$ – толщина льда по трассе (разрезу) (рис. 1);

$h_{\text{с}}$ – толщина снега по трассе (разрезу);

H – глубина моря по трассе (разрезу) м.

Разрез IV

Длина разреза 33.34 км

№ точки

	1	2	3	4	5	6	7
$h_{\text{л}}$ см	106	104	108	89	73	77	91
$h_{\text{с}}$ см	57						32
H м	8.5	11	12.2	12	12.5	12.3	8

Разрез V

Длина разреза 37.04 км

№ точки

	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$h_{\text{л}}$ см	103	97	89	105	118	123	110	108	117	118	118
$h_{\text{с}}$ см	32										42
H м	8	12.3	14	10.4	10.2	12.5	12	10.3	10.1	9.5	8

Разрез VI

Длина разреза 37.78 км

№ точки

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$h_{\text{л}}$ см	120	107	95	90	118	104	110	110	112	103	122	100
$h_{\text{с}}$ см	38											22
H м	7.5	7.9	8.6	9.6	10.2	11.2	11.8	12	11.4	11.7	12.5	7

Разрез VII

Длина разреза 33.34 км

№ точки

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$h_{\text{л}}$ см	108	108	98	105	102	116	108	120	102	109
$h_{\text{с}}$ см	25									44
H м	12	11.4	11.3	11	11.5	12	11.6	11.2	9.9	8.7

Разрез VIII

Длина разреза 45.93 км

№ точки

	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
$h_{\text{л}}$ см	128	120	117	110	122	118	122	120	116	119	120	104
$h_{\text{с}}$ см	44											36
H м	9.2	11.6	12.3	13.4	15.6	16.8	15.3	13.4	14	11.7	14.6	14

Разрез IX

Длина разреза 41.30 км

	№ точки									
	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
$h_{\text{л}}$ см	97	110	102	108	112	108	114	115	110	113
$h_{\text{с}}$ см	34									20
H м	11.3	11	12.4	19	20.5	17.8	15	12	7	4

Разрез X

Длина разреза 40.56 км

	№ точки											
	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74
$h_{\text{л}}$ см	113	115	112	117	112	101	102	108	110	110	94	107
$h_{\text{с}}$ см	20											18
H м	4	13.3	14.2	17	18.7	16.3	16	15.4	16.2	16.6	20	12

Разрез XI

Длина разреза 33.89 км

	№ точки								
	75	76	77	78	79	80	81	82	83
$h_{\text{л}}$ см	124	111	111	81	106	94	118	74	86
$h_{\text{с}}$ см	15								26
H м	10.5	15	21	20.4	20.5	21.9	21.4	16	8.3

Разрез XII

Длина разреза 33.52 км

	№ точки				
	84	85	86	87	88
$h_{\text{л}}$ см	82	84	72	75	72
$h_{\text{с}}$ см	28				14
H м	9	18.5	23	27.5	15

Разрез XIII

Длина разреза 33.34 км

	№ точки								
	89	90	91	92	93	94	95	96	97
$h_{\text{л}}$ см	79	78	88	66	76	106	103	106	90
$h_{\text{с}}$ см	12								18
H м	21	23	26.6	29	26.2	19	13	5.5	3

Разрез XIV

Длина разреза 44.45 км

	№ точки									
	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
$h_{\text{д}}$ см	80	115	109	70	65	78	88	83	84	100
$h_{\text{с}}$ см	18									9
H м	3	7	14	23	28.3	26.5	23.3	23	18	21

Разрез XV

Длина разреза 28.52 км

	№ точки					
	108	109	110	111	112	113
$h_{\text{д}}$ см	128	120	100	105	120	99
$h_{\text{с}}$ см	9					5
H м	13.5	11	5	18	24	30

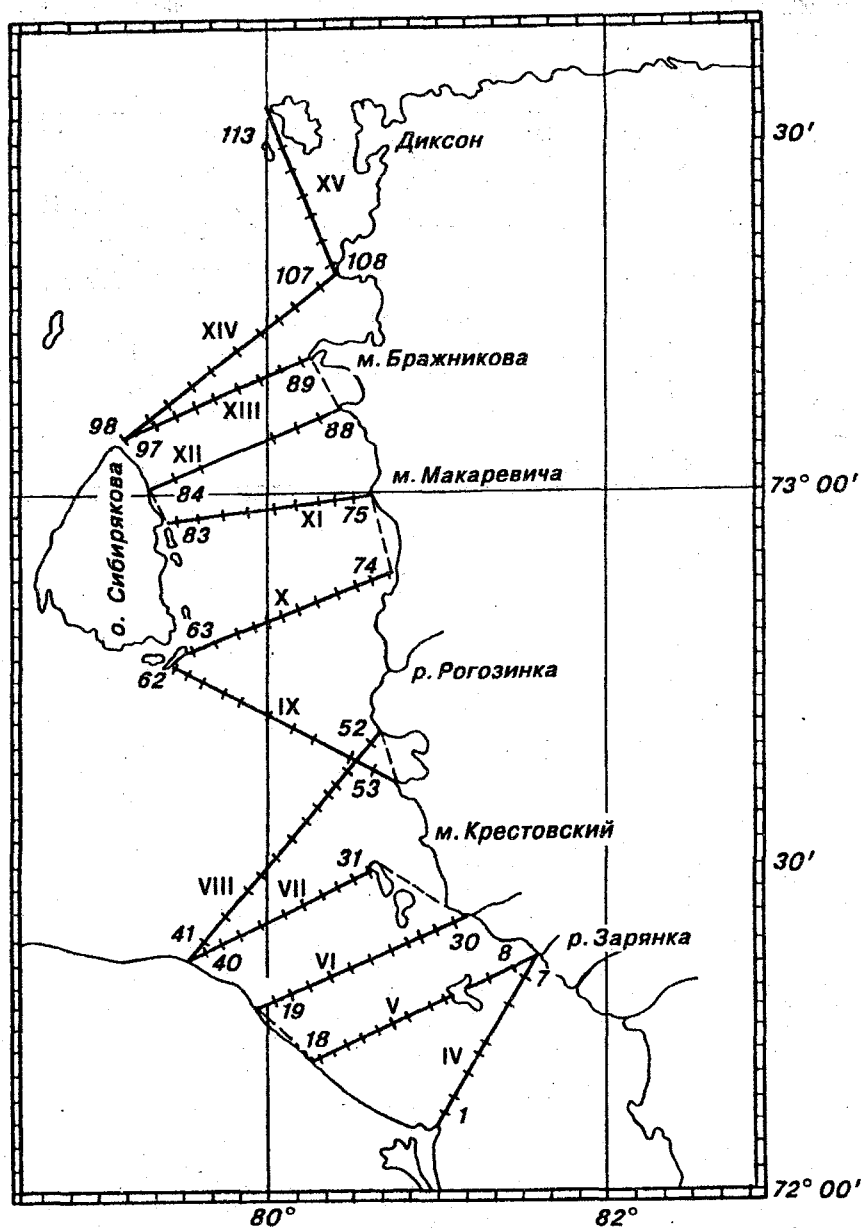


Рис. 1. Схема расположения ледовых разрезов. Енисейский залив.

Работа № 12

Охотское море
Тугурский залив
м. Носорог
Август 1989 г.

Площадь бассейна ПЭС – 18 км²
 Минимальный напор – 0.4 м

№ варианта	Ежечасные значения уровня моря (с 0 ч)												
1	634	780	918	1001	1006	913	783	649	540	451	399	399	
	441	529	639	717	761	726	624	510	414	351	340	392	621
2	485	614	783	925	1014	1006	898	753	614	503	409	361	
	375	436	545	659	742	796	741	622	508	397	326	325	618
3	383	507	650	810	950	1028	988	845	693	560	443	360	
	335	369	457	584	702	793	806	729	594	458	365	305	613
4	319	392	516	673	826	962	1017	944	791	638	508	402	
	335	339	402	519	656	784	859	835	718	570	452	368	618
5	307	344	429	566	720	885	995	1005	888	731	587	468	
	368	339	378	469	603	743	860	901	826	689	537	418	627
6	304	317	365	469	615	770	915	986	939	796	642	510	
	397	333	345	423	533	673	809	898	885	773	623	491	618
7	384	325	339	406	524	667	818	928	946	850	701	564	
	443	353	337	381	488	625	769	888	931	852	723	597	618
8	485	393	353	390	471	601	738	864	924	882	748	617	
	487	396	344	365	438	567	701	834	921	919	803	669	621
9	552	442	373	380	448	531	659	779	870	878	790	658	
	534	431	365	357	404	507	630	750	866	924	888	863	620
10	641	529	450	408	423	484	587	697	791	840	808	707	
	587	485	407	374	390	467	568	674	786	875	892	818	612
11	700	601	527	469	447	465	527	619	700	761	779	734	
	644	552	472	420	405	432	495	597	699	798	858	866	607
12	794	711	629	558	501	484	502	548	616	677	713	714	
	668	597	526	465	430	429	465	529	617	706	795	855	605
13	868	823	749	667	593	541	504	505	534	580	631	666	
	677	652	604	546	492	457	446	467	518	604	692	777	608
14	849	886	858	779	689	612	541	496	476	484	521	571	
	623	661	667	637	575	508	454	425	436	480	563	667	602
15	765	856	920	898	807	709	615	528	477	442	439	471	
	531	610	660	688	667	603	527	443	397	398	445	534	601

№ варианта	Ежечасные значения уровня моря (с 0 ч)											
16	654	781	888	949	930	834	724	607	513	440	402	410
	461	552	635	705	734	693	608	509	423	375	381	430 610
17	540	675	810	929	983	943	826	695	578	482	403	377
	399	468	571	675	753	765	703	586	476	386	330	347 612
18	407	524	667	821	945	998	929	791	653	529	419	358
	355	403	518	627	740	812	800	695	561	449	348	287 610
19	321	399	529	687	850	975	999	900	743	598	468	372
	333	365	448	582	717	830	881	820	681	543	419	327 616
20	286	335	445	571	739	892	990	968	824	659	520	399
	322	325	387	522	659	810	918	924	804	663	516	390 619
21	295	284	340	452	605	769	915	970	894	734	580	442
	335	290	336	425	577	739	898	967	919	776	617	486 610
22	356	283	297	378	492	652	806	925	933	806	650	495
	369	288	289	375	494	642	805	943	987	899	732	592 606
23	452	355	309	333	430	557	705	844	907	853	707	557
	426	318	271	306	397	535	695	853	964	976	867	717 597
24	580	462	378	351	388	475	600	724	837	858	778	637
	500	388	305	288	333	435	577	742	871	965	960	853 595
25	724	598	485	413	399	435	523	630	734	794	792	708
	584	468	381	323	327	379	479	616	751	886	950	937 596
26	837	736	635	524	457	438	469	528	613	693	739	732
	668	570	475	403	356	365	407	494	613	731	842	913 593
27	920	853	752	651	568	497	461	464	504	564	638	688
	705	673	603	515	438	390	381	407	479	589	702	814 594
28	908	940	902	810	707	612	527	466	445	461	512	589
	660	707	729	669	585	499	427	391	397	448	547	662 608
29	779	892	951	941	851	740	629	533	450	423	433	487
	572	665	735	766	727	634	528	441	386	378	426	505 620
30	623	763	883	960	950	850	722	600	493	415	382	396
	461	558	667	759	788	745	633	518	417	350	340	377 610

Работа № 13

Вариант 1

п.Красная горка $\delta = 108.3^\circ$

Февраль

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	2.0	3.9	0.4	0	0
СВ	4.6	4.6	1.1	0.05	0
В	4.0	6.0	1.0	0	0
ЮВ	5.0	5.5	2.3	0.2	0
Ю	5.0	7.0	3.1	0	0
ЮЗ	6.0	7.5	1.5	0	0
З	7.0	10.0	1.8	0.2	0
СЗ	4.0	5.7	0.5	0.05	0

Май

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	4.0	4.4	1.0	0	0
СВ	9.2	10.0	1.6	0.1	0.05
В	4.0	5.9	0.5	0	0
ЮВ	3.0	4.3	0.4	0.05	0
Ю	3.0	3.9	1.4	0.05	0
ЮЗ	5.1	6.5	1.1	0.2	0
З	7.8	10.0	2.2	0.05	0
СЗ	4.0	5.5	0.5	0.2	0

Вариант 3

п.Красная горка $\delta = 108.3^\circ$

Июнь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	21-24
С	0.7	3.1	2.4	0.7	0.03	0	0
СВ	0.8	4.3	3.4	1.2	0.1	0	0
В	0.8	5.0	2.6	0.3	0.03	0	0
ЮВ	0.9	4.6	2.2	0.1	0	0	0
Ю	0.8	5.2	2.4	0.2	0	0	0
ЮЗ	1.9	11.2	4.6	0.4	0	0	0
З	2.4	11.6	8.3	1.5	0.1	0	0
СЗ	1.0	8.0	5.8	1.1	0.2	0.01	0.03

Сентябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20	21-24
С	0.5	2.6	3.1	0.7	0.1	0.1	0.1
СВ	1.3	2.6	2.8	0.7	0	0	0
В	1.0	3.4	2.0	0.8	0.1	0	0
ЮВ	1.2	6.3	2.5	0.2	0	0	0
Ю	1.2	8.3	3.5	0.2	0	0.2	0
ЮЗ	2.2	14.0	7.1	1.3	0.2	0	0
З	2.6	7.8	4.5	1.4	0.3	0.1	0
СЗ	1.3	5.1	5.2	1.4	0	0	0

Вариант 2

п.Красная горка $\delta = 108.3^\circ$

Январь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.4	1.7	1.1	0.2	0.1
СВ	0.7	2.9	1.9	0.4	0
В	1.8	4.3	2.9	1.5	0.2
ЮВ	2.3	7.8	4.2	1.4	0.2
Ю	1.2	6.8	3.7	1.2	0.2
ЮЗ	2.5	8.8	4.1	1.2	0.1
З	2.7	9.2	6.6	6.0	0.4
СЗ	1.2	4.4	3.2	0.4	0.1

Июль

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.1	2.9	2.0	0.4	0.4
СВ	1.9	5.2	5.2	1.9	0
В	1.9	7.6	4.2	0.8	0
ЮВ	0.9	4.2	1.9	0.2	0
Ю	0.7	4.0	1.5	0.2	0
ЮЗ	1.6	6.9	3.7	0.4	0
З	3.0	12.0	7.4	1.3	0
СЗ	1.7	7.6	4.4	0.9	0

Вариант 4

п.Красная Горка $\delta = 108.3^\circ$

Август

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	3.1	4.5	0.1	0
СВ	6.0	6.9	0.6	0.05
В	4.0	4.9	0.2	0
ЮВ	5.1	5.3	0.2	0
Ю	5.0	6.1	1.0	0.05
ЮЗ	6.2	10.2	2.6	0.1
З	7.0	8.5	2.0	0.2
СЗ	4.0	5.7	0.4	0

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	2.0	3.5	0.2	0
СВ	2.0	3.0	0.6	0
В	3.0	6.7	0.7	0
ЮВ	5.5	10.0	1.8	0
Ю	6.0	12.7	3.3	0.7
ЮЗ	5.0	10.0	3.3	0.1
З	3.0	4.7	1.6	0.05
СЗ	3.2	6.5	0.8	0.05

Вариант 5

п. Красная горка

 $\delta = 108.3^\circ$ *Март*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.6	2.9	2.0	0.5	0.04	0
СВ	1.0	6.5	5.6	1.4	0.06	0
В	1.6	7.0	3.7	0.5	0.09	0
ЮВ	1.5	5.5	1.5	0.1	0	0
Ю	1.8	5.0	0.8	0.02	0	0
ЮЗ	2.5	9.9	3.6	0.1	0	0
З	2.8	10.9	5.7	1.2	0.09	0
СЗ	1.3	7.4	4.0	0.8	0	0

Октябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.4	2.7	3.9	0.9	0.4	0
СВ	0.4	2.2	2.0	0.8	0.2	0
В	0.6	2.4	2.7	0.7	0.3	0.03
ЮВ	1.5	7.3	2.8	0.6	0	0
Ю	1.5	7.6	4.4	0.6	0.03	0
ЮЗ	2.6	13.9	8.7	1.1	0.3	0
З	1.5	6.1	4.5	1.6	0.7	0
СЗ	0.6	4.2	4.7	1.8	0.7	0.04

Вариант 7

п. Зеленогорск

 $\delta = 98^\circ$ *Май*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.1	2.9	2.0	0.4	0.03	0
СВ	1.9	5.2	5.2	1.9	0.4	0
В	1.9	7.6	4.2	0.8	0.1	0
ЮВ	0.9	4.2	1.9	0.2	0	0
Ю	0.7	4.0	1.5	0.2	0.07	0
ЮЗ	1.6	6.9	3.7	0.4	0	0
З	3.0	11.5	7.4	1.3	0.2	0
СЗ	1.7	7.6	4.4	0.9	0.1	0

Октябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.9	3.1	1.8	0.4	0.1	0
СВ	1.0	5.1	4.1	1.3	0.2	0
В	1.3	5.5	3.0	0.6	0.03	0
ЮВ	1.9	6.7	1.9	0.1	0	0
Ю	1.5	6.7	2.2	0	0	0
ЮЗ	3.0	12.2	4.7	0.6	0.06	0
З	3.2	9.2	4.0	0.8	0.3	0.02
СЗ	2.0	5.7	4.2	0.5	0.09	0

Вариант 6

п. Зеленогорск

 $\delta = 98^\circ$ *Январь*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.5	1.8	1.4	0.1	0.03
СВ	0.4	2.7	1.9	0.5	0.06
В	1.3	3.7	3.7	1.1	0.4
ЮВ	2.6	9.1	5.4	1.2	0.09
Ю	2.2	6.3	4.4	0.9	0.03
ЮЗ	2.0	8.2	7.6	2.4	0.43
З	1.2	8.2	5.8	1.6	0.5
СЗ	0.9	5.2	3.6	0.5	0.06

Апрель

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.5	2.4	1.0	0.1	0
СВ	1.9	3.2	1.7	0.6	0.2
В	2.1	6.1	2.2	0.3	0
ЮВ	1.8	6.0	3.4	0.4	0.1
Ю	1.0	5.7	3.2	0.7	0
ЮЗ	1.5	8.8	5.9	1.2	0
З	3.2	12.4	7.2	1.6	0.4
СЗ	2.1	6.6	3.0	0.5	0

Вариант 8

п. Зеленогорск

 $\delta = 98^\circ$ *Июль*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	4.0	5.1	0.6	0	0
СВ	5.8	8.4	1.0	0	0
В	4.5	4.5	0.2	0	0
ЮВ	2.9	4.9	0.4	0	0
Ю	3.6	5.8	0.4	0	0
ЮЗ	4.7	10.3	1.3	0	0
З	6.3	10.3	3.3	0.2	0
СЗ	4.9	5.9	0.7	0	0

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	4.1	5.1	0.5	0.05	0
СВ	2.0	3.4	0.1	0.2	0
В	2.2	5.0	0.2	0	0
ЮВ	2.7	7.6	0.7	0	0
Ю	2.5	12.0	2.8	0.2	0
ЮЗ	4.0	13.6	3.7	0.2	0.1
З	3.6	8.9	2.4	0.3	0
СЗ	3.3	7.1	1.4	0.05	0

Вариант 9

п. Зеленогорск

$\delta = 98^\circ$

Август

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	4.0	5.1	0.6	0	0
СВ	5.8	8.4	1.0	0	0
В	4.5	4.5	0.2	0	0
ЮВ	2.9	4.9	0.4	0	0
Ю	2.6	5.8	0.4	0	0
ЮЗ	4.7	10.3	1.3	0	0
З	6.3	11.3	3.3	0.2	0
СЗ	4.9	5.9	0.7	0	0

Декабрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	4.1	5.1	0.5	0.05	0
СВ	2.0	3.4	0.1	0.2	0
В	2.2	5.0	0.2	0	0
ЮВ	2.7	7.6	0.7	0	0
Ю	2.5	12.0	2.8	0.2	0
ЮЗ	4.0	14.2	3.7	0.2	0.1
З	3.6	8.3	2.4	0.3	0
СЗ	3.3	7.1	1.4	0.05	0

Вариант 10

п. Зеленогорск

$\delta = 98^\circ$

Март

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.0	1.9	1.3	0.4	0	0
СВ	1.3	3.4	2.0	0.8	0.2	0
В	2.7	5.7	3.4	0.9	0.1	0
ЮВ	1.9	5.4	2.6	0.6	0.1	0
Ю	1.3	3.7	2.9	0.4	0.1	0
ЮЗ	2.0	8.0	6.0	1.0	0.3	0
З	3.4	13.9	8.0	2.1	0.4	0
СЗ	1.4	6.2	2.2	0.6	0.3	0

Июнь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.7	3.1	2.4	0.7	0.03	0.03
СВ	0.8	4.3	3.4	1.2	0.1	0
В	0.8	5.0	2.6	0.3	0.03	0
ЮВ	0.9	4.6	2.2	0.1	0	0.01
Ю	0.8	5.2	2.4	0.2	0	0
ЮЗ	1.9	11.2	4.6	0.4	0	0
З	2.4	11.6	8.3	1.5	0.1	0
СЗ	1.0	8.0	5.8	1.1	0.2	0

Вариант 11

п. Зеленогорск

$\delta = 98^\circ$

Февраль

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.7	3.1	2.4	0.7	0.01	0.02
СВ	0.8	4.3	3.4	1.2	0.1	0.01
В	0.8	5.0	2.6	0.3	0.03	0
ЮВ	0.9	4.6	2.2	0.1	0	0
Ю	0.8	5.2	2.4	0.2	0	0
ЮЗ	1.9	11.2	4.6	0.4	0	0
З	2.4	11.6	8.3	1.5	0.1	0
СЗ	1.0	8.0	5.8	1.1	0.2	0.03

Сентябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.5	2.6	3.1	0.7	0.1	0
СВ	1.3	2.6	2.8	0.7	0	0
В	1.0	3.4	2.0	0.8	0.1	0
ЮВ	1.2	6.3	2.5	0.2	0	0
В	1.2	8.3	3.8	0.2	0	0
З	2.6	7.5	4.5	2.4	0.3	0.1
СЗ	1.3	5.1	5.2	1.4	0	0

Вариант 12

п. Сестрорецк

$\delta = 188^\circ$

Март

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	3.3	4.2	0.8	0	0
СВ	6.0	7.4	1.0	0	0
В	3.8	6.2	0.8	0	0
ЮВ	0.8	4.4	1.0	0.05	0.05
Ю	1.8	5.7	3.1	0.1	0
ЮЗ	4.7	8.5	2.6	0.05	0
З	8.1	12.7	2.3	0.3	0
СЗ	4.2	5.3	0.7	0.05	0

Июнь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	3.0	5.2	0.5	0	0
СВ	3.6	8.8	0.9	0	0
В	2.9	3.5	0.3	0	0
ЮВ	2.2	5.5	0.7	0.04	0
ЮЗ	2.7	10.8	1.4	0	0
З	5.5	16.2	2.8	0.1	0
СЗ	6.2	6.3	1.3	0	0

Вариант 13п. Сестрорецк $\delta = 188^\circ$ *Январь*

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	2.7	3.4	0.4	0
СВ	1.7	5.7	0.4	0
В	2.2	4.3	2.2	0
ЮВ	1.8	8.4	2.0	0
Ю	2.4	1.5	2.1	0.2
ЮЗ	2.2	8.5	2.5	0.1
З	5.2	7.4	2.4	0
СЗ	6.4	12.8	6.8	4.3

Август

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	2.8	3.8	0.3	0
СВ	3.3	8.1	2.0	0
В	4.4	6.0	0.2	0.04
ЮВ	2.4	8.4	3.4	0
Ю	2.6	2.1	4.0	0
ЮЗ	3.9	10.6	3.5	0.06
З	7.3	10.7	1.3	0
СЗ	4.4	4.1	0.3	0

Вариант 15п. Сестрорецк $\delta = 188^\circ$ *Апрель*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.4	1.7	1.1	0.2	0.1	0
СВ	0.7	2.9	1.9	0.4	0.07	0
ЮВ	2.3	7.8	5.2	1.4	0.2	0
Ю	1.2	6.8	3.7	1.2	0.2	0
ЮЗ	2.5	8.8	6.1	1.2	0.1	0
З	2.7	9.2	6.6	2.4	0.4	0.03
СЗ	1.2	4.4	3.2	0.9	0.1	0

Сентябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.0	1.9	1.3	0.4	0.1	0
СВ	1.3	3.4	2.0	0.8	0.2	0
В	2.7	5.7	3.4	0.9	0.1	0
ЮВ	1.9	5.4	2.6	0.6	0.1	0
Ю	1.3	3.7	2.9	0.4	0.1	0
ЮЗ	2.0	8.0	6.0	1.0	0.3	0
З	3.4	13.9	8.0	2.1	0.4	0
СЗ	1.4	6.2	2.2	0.6	0.3	0

Вариант 14п. Сестрорецк $\delta = 188^\circ$ *Февраль*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.5	1.8	1.4	0.1	0.03	0
СВ	0.4	2.7	1.9	0.5	0.06	0
В	1.3	3.7	3.7	1.1	0.4	0
ЮВ	2.6	9.1	5.4	1.2	0.09	0
Ю	2.2	6.3	4.2	0.9	0.03	0
ЮЗ	2.0	8.2	7.6	2.4	0.4	0.03
З	1.4	8.2	5.8	1.6	0.5	0
СЗ	0.9	5.2	3.6	0.5	0.06	0

Июль

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.5	2.4	1.0	0.1	0	0
СВ	1.9	3.2	1.7	0.6	0.2	0
В	2.1	6.1	2.2	0.3	0	0
ЮВ	1.8	6.0	3.4	0.4	0.1	0
Ю	1.0	5.7	3.2	0.7	0	0
ЮЗ	1.5	8.8	5.9	1.2	0.1	0
З	3.2	12.4	7.2	1.6	0.3	0
СЗ	2.1	6.6	3.0	0.5	0	0

Вариант 16п. Сестрорецк $\delta = 188^\circ$ *Май*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.5	1.5	1.4	0.5	0.06
В	1.3	3.7	3.7	1.3	0.4
ЮВ	2.6	9.1	5.4	1.2	0.09
Ю	2.2	6.3	4.2	0.9	0.03
ЮЗ	2.0	8.2	7.6	2.4	0
З	1.4	8.2	5.8	1.6	0.1
СЗ	0.9	5.2	3.6	0.5	0.06

Октябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.0	1.9	1.3	0.4	0.1
СВ	1.3	3.4	2.0	0.8	0.2
В	2.7	5.7	3.4	0.9	0.1
ЮВ	1.9	5.4	2.6	0.6	0.1
Ю	1.3	3.7	2.9	0.4	0.1
ЮЗ	2.0	8.0	6.0	1.0	0.3
З	3.4	13.9	8.0	2.1	0.4
СЗ	1.4	6.2	2.2	0.6	0.3

Вариант 17

п. Кайболово

Февраль

 $\delta = 344^\circ$

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.4	5.4	2.8	0.6	0.1
СВ	1.0	4.6	3.2	0.8	0
В	1.5	6.8	4.5	1.2	0.2
ЮВ	2.0	7.3	3.9	1.9	0.5
Ю	1.9	7.8	4.4	1.8	0.6
ЮЗ	0.7	6.2	5.8	1.8	0.3
З	0.6	4.5	4.4	1.0	0.2
СЗ	0.4	4.3	2.4	1.0	0.2

Май

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.0	8.1	2.5	0.3	0
СВ	0.8	8.5	7.0	1.3	0.3
В	1.6	6.0	2.6	0.5	0.1
ЮВ	1.0	5.0	2.5	0.5	0.15
Ю	0.8	3.7	3.7	0.9	0.25
ЮЗ	1.0	3.8	3.6	1.7	0.3
З	0.8	9.0	5.6	1.4	0.1
СЗ	1.1	8.8	3.2	0.4	0.1

Вариант 19

п. Кайболово

Август

 $\delta = 344^\circ$

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	2.7	6.5	1.7	0.3	0.1	0.1
СВ	1.7	7.4	2.5	0.4	0.1	0
В	1.3	6.4	1.5	0.2	0.2	0
ЮВ	2.7	7.9	3.4	1.3	0.4	0
Ю	0.8	3.7	3.7	0.9	0.2	0
ЮЗ	0.9	5.8	5.3	2.5	0.8	0
З	1.4	7.4	5.9	1.1	0.4	0
СЗ	1.5	5.2	2.8	0.4	0.5	0

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.7	3.3	2.4	1.2	0.6	0.1
СВ	0.3	2.5	1.4	0.5	0.2	0
В	1.2	6.1	5.3	1.2	0.1	0
ЮВ	0.6	8.4	10.0	2.6	0.3	0
Ю	1.1	8.8	9.0	1.8	0.5	0
ЮЗ	1.0	6.1	6.3	1.9	0.7	0.2
З	0.5	1.8	2.8	1.1	0.2	0
СЗ	0.3	1.7	3.5	1.0	0.7	0

Вариант 18

п. Кайболово

Январь

 $\delta = 344^\circ$

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.5	1.8	1.4	0.1	0.03	0.02
СВ	0.4	2.7	1.9	0.5	0.06	0
В	1.8	4.3	2.9	1.5	0.2	0
ЮВ	2.3	7.8	5.2	1.4	0.2	0
Ю	2.2	6.8	3.7	3.2	0.2	0.06
ЮЗ	2.5	8.8	6.1	2.2	0.1	0
З	2.7	4.2	6.6	2.4	0.4	0.03
СЗ	2.2	4.4	3.2	0.9	0.1	0

Июнь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.5	2.4	1.0	0.1	0	0
СВ	1.9	3.2	1.7	0.6	0.2	0
В	2.1	6.1	2.2	0.3	0	0
ЮВ	1.8	6.0	3.4	0.4	0.1	0
Ю	1.0	5.7	3.2	0.7	0	0
ЮЗ	1.5	8.8	5.9	1.2	0	0
З	3.2	12.4	7.2	1.6	0.4	0
СЗ	2.1	6.6	3.0	0.5	0	0

Вариант 20

п. Кайболово

Июль

 $\delta = 344^\circ$

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.5	2.6	3.1	0.7	0.1
СВ	1.3	2.6	2.8	0.7	0
В	1.0	3.4	2.0	0.8	0.1
ЮВ	1.2	6.3	2.5	0.2	0.1
Ю	1.2	8.3	3.8	0.2	0
ЮЗ	2.2	13.1	7.1	1.3	0.2
З	2.6	7.8	4.5	2.4	0.3
СЗ	1.3	5.1	5.2	1.4	0

Декабрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.5	2.1	1.9	0.4	0
СВ	0.5	1.9	1.8	0.3	0.1
В	1.1	4.3	3.9	0.9	0.21
ЮВ	1.7	8.9	5.9	1.1	0.3
Ю	2.1	7.0	4.2	1.2	0.09
ЮЗ	2.2	10.0	9.2	2.0	0.5
З	1.1	4.4	4.4	2.1	0.4
СЗ	1.3	4.3	4.2	1.2	0.3

Вариант 21

п. Молдова

 $\delta = 92^\circ$ *Март*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	0.8	5.0	2.0	0.7	0.2	0
СВ	1.2	7.2	3.2	0.9	0.05	0
В	1.4	7.3	3.4	0.5	0.1	0
ЮВ	1.3	6.6	2.7	1.0	0.05	0
Ю	1.5	5.5	4.1	1.6	0.5	0.1
ЮЗ	1.2	6.3	6.0	1.8	0.5	0
З	2.0	6.6	5.2	1.6	0.2	0.1
СЗ	0.8	4.1	3.1	1.2	0.3	0.1

Июнь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.5	7.7	2.0	0.1	0	0
СВ	1.4	5.8	4.3	0.1	0	0
В	1.2	4.5	1.4	0.1	0	0
ЮВ	0.9	6.0	1.9	0.2	0	0
Ю	0.6	4.9	3.4	0.6	0.1	0
ЮЗ	0.5	4.6	6.2	1.8	0.2	0
З	1.8	9.1	9.0	1.9	0.2	0.1
СЗ	2.2	8.8	4.3	0.5	0.1	0

Вариант 23

п. Молдова

 $\delta = 92^\circ$ *Июль*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.5	7.7	2.0	0.1	0	0
СВ	1.4	5.8	4.3	0.1	0	0
В	1.2	4.5	1.4	0.1	0	0
ЮВ	0.9	6.0	1.9	0.2	0	0
Ю	0.6	4.9	3.4	0.6	0.1	0
ЮЗ	0.5	4.6	6.2	1.8	0.2	0
З	1.8	9.1	9.0	1.9	0.2	0.1
СЗ	2.2	8.8	4.3	0.5	0.1	0

Сентябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.4	5.7	3.3	0.7	0.1	0
СВ	1.4	4.7	2.1	0.1	0.2	0
В	1.7	4.8	1.5	0	0	0
ЮВ	2.2	6.8	3.9	0.5	0	0
Ю	1.9	8.2	5.7	0.8	0.2	0
ЮЗ	1.3	6.6	7.0	2.5	0.6	0.1
З	2.0	5.7	4.2	1.9	0.2	0
СЗ	0.8	3.8	4.0	1.2	0.2	0

Вариант 22

п. Молдова

 $\delta = 92^\circ$ *Апрель*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.6	2.9	2.0	0.5	0.06
СВ	1.0	6.5	5.6	1.4	0.06
В	1.6	7.0	3.7	0.5	0.09
ЮВ	1.5	5.5	1.5	0.1	0
Ю	1.8	5.0	0.8	0.02	0
ЮЗ	2.5	9.9	3.6	0.1	0
З	2.8	10.9	5.7	1.2	0.07
СЗ	1.3	7.4	4.0	0.8	0

Октябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.4	2.7	3.9	0.9	0.4
СВ	0.4	2.2	2.0	0.8	0.2
В	0.6	2.4	2.7	0.7	0.7
ЮВ	1.5	7.3	2.8	0.6	0
Ю	1.5	7.6	4.4	0.6	0.03
ЮЗ	2.6	13.9	8.7	1.1	0.3
З	1.5	6.1	4.5	1.8	0.7
СЗ	0.6	4.2	4.7	1.8	0.17

Вариант 24

п. Валасте

 $\delta = 95^\circ$ *Август*

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	4.2	3.4	0.1	0
СВ	6.8	0.1	0.6	0.05
В	4.6	4.3	0.2	0
ЮВ	5.1	6.3	2.2	0.1
Ю	4.2	6.9	3.0	0.05
ЮЗ	4.9	12.0	2.6	0.1
З	5.8	9.7	2.0	0.2
СЗ	5.1	4.6	0.4	0.4

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13
С	2.3	3.2	0.2	0
СВ	1.5	3.5	0.6	0
В	2.7	7.0	0.7	0
ЮВ	2.6	13.0	1.8	0
Ю	3.3	15.0	3.7	0.1
ЮЗ	2.5	13.0	3.3	0.1
З	2.5	5.2	1.6	0.05
СЗ	3.4	6.3	0.8	0.05

Вариант 25

п.Валасте

 $\delta = 95^\circ$ *Июль*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	5.0	4.0	0.3	0	0.05
СВ	3.7	4.4	0.3	0.05	0.05
В	3.2	3.5	0.05	0	0
ЮВ	3.1	6.3	0.4	0	0
Ю	3.5	10.1	2.0	0.05	0
ЮЗ	5.5	11.5	2.9	0.05	0.1
З	4.1	10.2	2.1	0.1	0.05
СЗ	5.4	7.3	0.6	0.05	0

Декабрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	2.1	2.7	0.2	0	0
СВ	2.5	4.0	0.2	0	0
В	3.8	5.4	0.4	0	0
ЮВ	2.1	8.7	2.5	0.1	0
Ю	2.0	13.6	5.0	0.2	0
ЮЗ	2.2	13.2	4.7	0.2	0
З	4.7	6.6	2.0	0.1	0.05
СЗ	3.5	6.8	0.4	0.05	0

Вариант 27

п.Копорская губа

 $\delta = 72^\circ$ *Июнь*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.6	2.9	2.0	0.5	0.06
СВ	1.0	6.5	5.6	1.4	0.06
В	1.6	7.0	3.7	0.5	0.09
ЮВ	1.5	5.5	1.5	0.1	0
Ю	1.8	5.0	0.8	0.02	0
ЮЗ	2.5	9.9	3.6	0.1	0
З	2.8	10.9	5.7	1.2	0.07
СЗ	1.3	7.4	4.0	0.8	0

Октябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.4	2.7	3.9	0.9	0.4
СВ	0.4	2.2	2.0	0.8	0.2
В	0.6	2.4	2.7	0.7	0.33
ЮВ	1.5	7.3	2.8	0.6	0
Ю	1.5	7.6	4.4	0.6	0.03
ЮЗ	2.6	13.9	8.7	1.1	0.3
З	1.5	6.1	4.5	1.6	0.7
СЗ	0.6	4.2	4.7	1.8	0.74

Вариант 26

п.Валасте

 $\delta = 95^\circ$ *Май*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.2	1.4	1.6	0.8	0
СВ	0.4	1.4	1.6	0.6	0
В	0.4	2.6	3.4	1.6	0.1
ЮВ	1.8	8.8	7.7	1.4	0.7
Ю	2.2	11.3	5.4	1.0	0.5
ЮЗ	2.1	12.3	7.4	1.9	0.3
З	0.8	3.9	3.6	1.7	0.2
СЗ	0.5	3.4	3.1	1.5	0.4

Декабрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0	1.3	4.3	4.2	1.2
СВ	0.5	2.1	1.9	0.4	0.1
В	0.5	1.9	1.8	0.3	0.2
ЮВ	1.1	4.3	3.9	0.9	0.23
Ю	1.7	8.9	5.9	1.1	0.38
ЮЗ	2.1	7.0	4.2	1.2	0.09
З	2.2	10.0	9.2	2.0	0.5
СЗ	1.1	4.4	4.4	2.1	0.4

Вариант 28

п.Копорская губа

 $\delta = 72^\circ$ *Май*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.4	5.7	3.3	0.7	0.1
СВ	1.4	4.7	2.1	0.1	0.2
В	1.7	4.8	1.5	0	0
ЮВ	2.2	6.8	3.9	0.5	0.1
Ю	1.9	8.2	5.7	0.8	0.2
ЮЗ	1.3	6.6	7.0	2.5	0.6
З	2.0	5.7	4.2	1.9	0.2
СЗ	0.8	3.8	4.0	1.2	0.2

Сентябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.3	2.9	3.3	0.8	0.1
СВ	0	2.5	2.2	0.6	0.2
В	1.5	7.4	3.5	0.6	0.1
ЮВ	1.8	8.9	8.9	1.7	0.6
Ю	1.1	6.2	8.4	3.0	1.1
ЮЗ	0.6	5.0	7.8	3.6	1.9
З	0.1	2.4	3.4	1.5	0.5
СЗ	0.3	1.9	2.3	0.6	0.4

Вариант 29

п. Копорская губа

 $\delta = 72^\circ$ *Февраль*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	0.4	1.7	1.1	0.2	0
СВ	0.7	2.9	1.9	0.4	0.7
В	1.8	4.3	2.9	1.5	0.2
ЮВ	2.3	7.8	5.2	1.4	0.2
Ю	1.2	6.8	3.7	1.2	0.1
ЮЗ	2.5	8.8	6.1	1.2	0.1
З	2.7	9.2	6.6	2.4	0
СЗ	1.2	4.4	3.2	0.9	0.1

Август

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17
С	1.5	2.4	1.0	1.0	0
СВ	1.9	3.2	1.7	0.6	0
В	2.1	6.1	2.2	0.3	0
ЮВ	1.8	6.0	3.4	0.4	0.1
Ю	1.0	5.7	3.2	0.7	0
ЮЗ	1.5	8.8	5.9	1.2	0
З	3.2	12.4	7.2	1.2	0.3
СЗ	2.1	6.6	3.0	0.3	0

Вариант 30

п. Копорская губа

 $\delta = 72^\circ$ *Апрель*

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.4	5.4	2.8	0.6	0.1	0
СВ	1.0	4.6	3.2	0.8	0	0.05
В	1.5	6.8	4.5	0.8	0.2	0.1
ЮВ	2.0	7.3	3.9	1.6	0.5	0.1
Ю	1.9	7.8	4.4	1.8	0.6	0
ЮЗ	0.7	6.2	5.8	1.8	0.3	0.2
З	0.6	4.5	4.4	1.0	0.2	0.05
СЗ	0.4	4.3	2.4	1.0	0.2	0.2

Ноябрь

	0-1	2-5	6-9	10-13	14-17	18-20
С	1.0	8.1	2.5	0.3	0	0
СВ	0.8	8.5	7.0	1.3	0.3	0
В	1.6	6.0	2.6	0.5	0.1	0.05
ЮВ	1.0	5.0	2.5	0.5	0	0
Ю	0.8	3.7	3.7	0.9	0.2	0
ЮЗ	1.0	3.8	3.6	1.7	0.3	0.1
З	0.8	9.0	5.6	1.4	0.1	0.05
СЗ	1.1	8.8	3.2	0.4	0.1	0

Работа № 14

Вариант 1

H	T	S
1	22.887	17.754
10	16.614	17.984
20	9.095	18.070
30	7.617	18.123
40	7.224	18.165
50	7.062	18.219
60	6.976	18.313
70	7.006	18.429
80	7.075	18.572
90	7.109	18.642

$$q_0 = 0.40 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.40 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1002.6 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.50 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.085$$

$$\mu = 2.44$$

Вариант 2

H	T	S
1	24.029	17.741
10	22.226	18.018
20	10.457	18.044
30	7.819	18.098
40	7.163	18.182
50	6.893	18.305
60	6.745	18.458
70	6.973	18.651
80	7.193	18.868
90	7.379	19.149
100	7.529	19.411
110	7.719	19.712

$$q_0 = 0.80 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.80 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1006.22 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.95 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.098$$

$$\mu = 2.60$$

Вариант 3

H	T	S
1	22.822	17.846
10	22.456	17.871
20	9.400	18.069
30	7.832	18.124
40	7.239	18.204
50	6.890	18.317
60	7.007	18.584
70	7.286	18.951
80	7.556	19.430
85	7.629	19.607

$$q_0 = 0.45 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.45 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1006.75 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.60 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.12$$

$$\mu = 2.42$$

Вариант 4

H	T	S
1	23.454	18.035
10	23.445	18.046
20	9.664	18.150
30	7.602	18.239
40	6.794	18.369
50	6.848	18.667
60	7.281	19.145
70	7.609	19.621

$$q_0 = 0.70 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.70 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1004.12 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.65 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.086$$

$$\mu = 2.90$$

Вариант 5

H	T	S
1	24.006	18.146
10	23.917	18.175
20	13.254	18.201
30	7.901	18.225
40	8.849	18.356
50	6.925	18.702
60	7.354	19.267
70	7.629	19.634

$$q_0 = 0.57 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.57 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.72 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.55 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.13$$

$$\mu = 2.44$$

Вариант 6

H	T	S
1	23.441	17.953
10	23.422	17.952
20	10.022	18.147
30	7.860	18.200
40	7.073	18.285
50	6.600	18.503
60	7.255	19.030
70	7.591	19.513
80	7.782	19.882

$$q_0 = 0.71 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.71 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.42 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.61 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.099$$

$$\mu = 2.82$$

Вариант 7

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	23.531	17.992
10	23.458	18.086
20	14.271	18.167
30	7.930	18.240
40	6.879	18.386
50	6.912	18.768
60	7.571	19.433
70	7.737	19.765

$$q_0 = 0.47 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.47 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1004.73 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.52 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.14$$

$$\mu = 2.55$$

Вариант 8

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.740	17.898
10	20.783	17.930
20	16.174	18.007
30	8.834	18.054
40	7.818	18.082
50	7.140	18.154
60	6.938	18.262
70	6.976	18.438
80	7.120	18.734
90	7.352	19.065
100	7.528	19.420

$$q_0 = 0.61 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.61 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.73 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.58 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.098$$

$$\mu = 2.78$$

Вариант 9

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.697	17.432
10	21.856	17.461
20	13.553	17.924
30	8.898	18.060
40	7.639	18.123
50	7.103	18.197
60	7.054	18.269
70	7.046	18.546
80	7.046	18.549
90	7.048	18.552
100	7.069	18.589

$$q_0 = 0.62 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.62 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1010.98 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.49 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.18$$

$$\mu = 2.56$$

Вариант 10

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	23.176	17.942
10	23.182	17.948
20	12.192	18.155
30	8.268	18.137
40	7.397	18.239
50	6.895	18.363
60	7.144	18.771
70	7.419	19.161
80	7.587	19.511
85	7.747	19.746

$$q_0 = 0.68 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.68 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.94 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.49 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.111$$

$$\mu = 2.79$$

Вариант 11

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.340	17.702
10	19.379	17.927
20	9.854	18.024
30	7.910	18.113
40	7.277	18.163
50	7.025	18.208
60	6.956	18.313
70	7.065	18.520
80	7.305	18.910
90	7.566	19.426
95	7.669	19.619

$$q_0 = 0.54 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.54 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1009.71 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.54 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.12$$

$$\mu = 2.59$$

Вариант 12

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.688	17.926
10	22.693	17.925
20	10.715	18.166
30	7.872	18.154
40	7.007	18.231
50	6.928	18.336
60	7.124	18.674
70	7.435	19.201
80	7.644	19.564
90	7.814	19.864

$$q_0 = 0.59 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.59 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1007.61 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.49 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.099$$

$$\mu = 2.62$$

Вариант 13

H	T	S
1	22.605	17.953
10	22.605	17.948
20	9.407	18.077
30	7.705	18.134
40	7.103	18.190
50	6.922	18.323
60	7.139	18.680
70	7.403	19.089
80	7.649	19.567
90	7.856	19.916

$q_0 = 0.59 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.59 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1009.88 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.47 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.135$

$\mu = 2.59$

Вариант 14

H	T	S
1	23.004	17.919
10	22.998	17.932
20	14.951	18.172
30	8.225	18.183
40	7.014	18.284
50	6.759	18.549
60	7.340	19.041
70	7.542	19.434
80	7.699	19.688

$q_0 = 0.61 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.61 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1006.24 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.50 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.109$

$\mu = 2.72$

Вариант 15

H	T	S
1	22.376	17.678
10	22.258	17.678
20	9.311	18.059
30	7.643	18.125
40	7.111	18.196
50	6.943	18.311
60	6.847	18.711
70	7.451	19.308
80	7.645	19.625

$q_0 = 0.52 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.52 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1009.99 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.51 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.125$

$\mu = 2.64$

Вариант 16

H	T	S
1	24.542	18.030
10	23.940	18.047
20	16.475	18.209
30	7.869	18.221
40	7.108	18.296
50	6.875	18.503
60	7.014	18.797
70	7.440	19.351
80	7.751	19.809

$q_0 = 0.45 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.45 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1007.21 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.41 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.105$

$\mu = 2.75$

Вариант 17

H	T	S
1	23.324	17.726
10	22.822	17.908
20	14.970	18.007
30	8.151	18.068
40	7.582	18.111
50	7.018	18.217
60	7.007	18.328
70	7.007	18.382
80	6.988	18.472
90	7.036	18.573
100	7.155	18.740
110	7.304	18.958
120	7.724	19.696

$q_0 = 0.53 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.53 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1010.65 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.46 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.133$

$\mu = 2.51$

Вариант 18

H	T	S
1	22.309	17.589
10	12.432	17.951
20	8.592	18.058
30	7.945	18.094
40	7.510	18.139
50	7.254	18.752
60	7.218	18.224
70	7.017	18.312
80	7.036	18.432
90	7.076	18.597
100	7.326	18.988
110	7.581	19.462
120	7.659	19.599

$q_0 = 0.63 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.63 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1008.29 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.53 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.112$

$\mu = 2.77$

Вариант 19

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	21.839	17.861
10	12.054	18.081
20	8.632	18.050
30	8.121	18.084
40	7.415	18.133
50	7.130	18.201
60	6.990	18.279
70	7.021	18.477
80	7.299	18.973
90	7.482	19.282
100	7.712	19.697

$q_0 = 0.54 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.54 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1008.77 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.54 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.122$

$\mu = 2.74$

Вариант 20

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.232	17.573
10	21.992	17.584
20	10.136	18.032
30	8.125	18.074
40	7.346	18.150
50	6.966	18.249
60	7.066	18.416
70	7.110	18.678
80	7.391	19.114
90	7.583	19.482
100	7.784	19.806

$q_0 = 0.55 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.55 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1010.37 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.46 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.107$

$\mu = 2.79$

Вариант 21

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	23.164	17.715
10	22.511	17.725
20	11.769	18.051
30	8.086	18.089
40	7.227	18.157
50	6.980	18.231
60	6.941	18.361
70	7.154	18.706
80	7.381	19.093
90	7.577	19.498
100	7.796	19.842

$q_0 = 0.68 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.68 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1009.43 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.49 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.117$

$\mu = 2.67$

Вариант 22

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	23.347	17.772
10	23.041	17.781
20	15.223	18.066
30	8.041	18.026
40	7.372	18.144
50	6.998	18.221
60	6.945	18.437
70	7.311	18.937
80	7.558	19.424
90	7.742	19.751

$q_0 = 0.69 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.69 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1007.35 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.51 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.117$

$\mu = 2.79$

Вариант 23

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	22.901	17.759
10	22.605	17.751
20	12.721	18.042
30	9.211	18.052
40	7.799	18.140
50	7.110	18.217
60	6.928	18.338
70	7.027	18.530
80	7.300	19.018
90	7.519	19.385
100	7.723	19.717

$q_0 = 0.72 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.72 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1003.98 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.59 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.109$

$\mu = 2.71$

Вариант 24

<i>H</i>	<i>T</i>	<i>S</i>
1	23.318	17.820
10	22.869	17.820
20	13.804	17.857
30	9.197	18.034
40	7.887	18.098
50	7.259	18.134
60	7.000	18.212
70	6.954	18.307
80	7.061	18.477
90	7.298	18.895
100	7.373	19.049
110	7.412	19.123
120	7.516	19.324

$q_0 = 0.42 \text{ м}^2/\text{с}$

$Q_0 = 0.42 \text{ м}^3/\text{с}$

$\rho_a = 1005.33 \text{ кг/м}^3$

$u = 0.38 \text{ м/с}$

$\alpha = 0.101$

$\mu = 2.72$

Вариант 25

H	T	S
1	22.877	17.760
10	22.393	17.757
20	12.433	18.052
30	8.477	18.053
40	7.771	18.105
50	7.187	18.169
60	6.919	18.250
70	6.986	18.428
80	7.272	18.896
90	7.422	19.210
100	7.645	19.571

$$q_0 = 0.66 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.66 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1007.54 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.36 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.116$$

$$\mu = 2.54$$

Вариант 26

H	T	S
1	22.435	17.771
10	22.426	17.771
20	10.333	18.023
30	8.291	18.066
40	7.822	18.117
50	7.263	18.160
60	7.077	18.195
70	6.955	18.282
80	7.011	18.506
90	7.237	18.817
100	7.435	19.198
110	7.564	19.507

$$q_0 = 0.71 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.71 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1006.27 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.49 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.107$$

$$\mu = 2.71$$

Вариант 27

H	T	S
1	23.156	17.831
10	23.077	17.879
20	9.789	18.030
30	8.224	18.079
40	7.486	18.137
50	7.350	18.152
60	7.152	18.186
70	7.033	18.234
80	7.009	18.295
90	7.045	18.466

$$q_0 = 0.58 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.58 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.74 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.48 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.108$$

$$\mu = 2.70$$

Вариант 28

H	T	S
1	23.164	15.3
10	22.727	17.5
20	13.055	17.7
30	8.779	18.1
40	7.822	18.4
50	7.268	18.7
60	7.042	18.9
70	6.987	19.1
80	6.993	19.3

$$q_0 = 0.43 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.43 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1005.88$$

$$u = 0.40 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.100$$

$$\mu = 2.75$$

Вариант 29

H	T	S
1	23.268	15.942
10	22.741	17.309
20	15.344	17.845
30	9.044	17.952
40	7.342	18.051
50	7.133	18.140
60	6.983	18.258
70	7.013	18.322
80	7.085	18.536

$$q_0 = 0.62 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.62 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1007.89 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.39 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.108$$

$$\mu = 2.58$$

Вариант 30

H	T	S
1	23.042	16.827
10	23.027	17.324
20	14.946	17.856
30	9.331	18.021
40	7.432	18.101
50	7.102	18.132
60	6.980	18.221
70	6.986	18.308
80	7.004	18.398

$$q_0 = 0.74 \text{ м}^2/\text{с}$$

$$Q_0 = 0.74 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\rho_a = 1006.33 \text{ кг/м}^3$$

$$u = 0.50 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 0.101$$

$$\mu = 2.68$$

фсетная.

Евгений Юрьевич Ключков
Инженерная океанология
Практические работы
Учебное пособие

Редактор О.Д. Рейнгеверц

ЛР № 020309 от 28.11.91

20

Сдано в набор Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать оф.
Печ. л. 12.7. Уч.-изд. л. 12.7. Тираж 200 экз. Заказ №
РГГМИ, 195196, С.-Петербург, Малоохтинский пр., 98

Типография