рег. № 4725

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

«Утверждаю»

Первый проректор по науке, инновациям
и подготовке кадров высшей квалификации

Ю.М. Борисов

Технический отчёт
по договору № 73/12-Н

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЛЕНИЙ БЕРЕГОВЫХ ОТКОСОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПОКРЫТИЯ БЕТОННОГО ЗАЩИТНОГО ГИБКОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО (ПБЗГУ) ПО ТУ 5859-002-59565714-2012, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ЛЕДОВОЙ И ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ

(гидравлические расчеты)

Научный руководитель,
д.т.н., профессор

В.Ф. Бабкин

Ответственный исполнитель,
к.т.н., профессор

Е.В. Дроздов

Воронеж - 2012

Содержание

стр.

Введение ……. 3

1. Расчет устойчивости креплений земляных откосов, выполненных из ПБЗГУ, при воздействии на них статической нагрузки термически расширяющегося сплошного ледяного покрова ……... 6

1.1 Постановка задачи …… 6

1.2 Физико-математическое обеспечение задачи …….. 6

1.3 Результаты вычислений и их анализ ……... 10

1.4 Выводы и предложения 14

2. Расчетно-теоретическое исследование устойчивости креплений земляных откосов, выполненных из ПБЗГУ, при воздействии нагрузки от ледяного покрова при колебаниях уровня воды в водоеме 15

2.1 Постановка задачи 15

2.2 Физико-математическое обеспечение задачи 16

2.3 Результаты вычислений и их анализ 22

2.4 Выводы и предложения 31

3. Расчет устойчивости креплений земляных откосов, выполненных из ПБЗГУ, при воздействии на них волновой нагрузки 32

3.1 Постановка задачи 32

3.2 Физико-математическое обеспечение задачи 32

3.3 Результаты вычислений и их анализ 38

3.4 Выводы и предложения 45

Заключение 46

Список использованной литературы 47

Введение

Покрытие бетонное защитное гибкое универсальное (ПБЗГУ), представляющее бетонные блоки, связанные между собой соединительным канатом, находят всё большее применение для защиты подводных переходов трубопроводов, опор мостов, гребней плотин и дамб, защиты акваторий портов, при строительстве дорог и в других отраслях народного хозяйства страны. ПБЗГУ могут использоваться и для защиты и укрепления откосов различных гидротехнических сооружений и берегов водоемов и водотоков.

ПБЗГУ поставляется в виде отдельных плит, оснащенных соединительными элементами для их дальнейшей сборки. В настоящее время ООО «Спецпром 1» разработаны и серийно изготавливаются различные модели плит ПБЗГУ, описание которых представлено в ТУ 5859-002-59565714-2012 [10]. Каждая плита ПБЗГУ (рис. В1) состоит из 36 бетонных блоков 1, скрепленных между собой размещенным в них соединительным канатом 2. Периферийные бетонные блоки имеют монтажные крепёжные петли 3, а так же для скрепления плит в ПБЗГ дополнительные монтажные канаты (ДМК) 4 и закладные детали 5.

Различные модели ПБЗГУ отличаются между собой размерами и формой входящих в них бетонных блоков. Бетонные блоки представляют собой двухсторонние усечённые пирамиды, то есть две усечённые прямоугольные пирамиды, соединенные между собой по плоскости общего большего основания в единый монолитный бетонный блок.

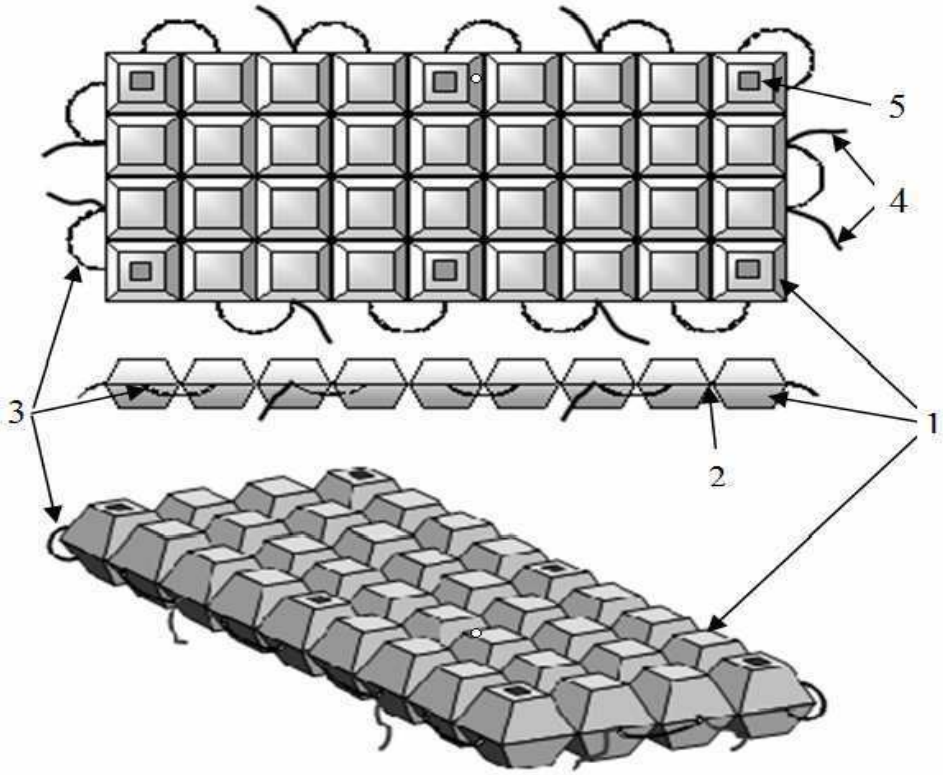

Рис. В1.Покрытие бетонное защитное гибкое универсальное (ПБЗГУ)

ПБЗГУ с блоками данной формы изготовляют с использованием формообразующей оснастки (основание и крышка), в которую укладывают и закрепляют соединительный канат, а затем оснастку заполняют жидкой бетонной смесью. После затвердевания бетонной смеси крышку формообразующей оснастки снимают и из основания извлекают плиту ПБЗГУ.

Бетонные блоки, входящие в различные модели ПБЗГУ, различаются между собой высотой самих блоков, а также высотой смежных усечённых пирамид и углом наклона их граней. Если углы наклона боковых граней или высота смежных усечённых пирамид одинаковы, то ПБЗГУ считается симметричным. Если смежные усечённые пирамиды бетонных блоков имеют различные углы наклона боковых граней или высоту, то ПБЗГУ считается асимметричным.

В настоящее время ООО «Спецпром 1» серийно изготовляет плиты ПБЗГУ трёх моделей: симметричные ПБЗГУ моделей №1 и №2 и асимметричные ПБЗГУ модели №4, [10].

Основные характеристики и геометрические размеры плит ПБЗГУ, изготовляемых по ТУ-5859-002-59565714-2012, представлены в табл. В1.

Таблица В1

Основные характеристики и геометрические размеры плит ПБЗГУ

Параметры	Номер модели плиты ПБЗГУ		
	№1	№2	№4
Габаритная длина, мм	2746	2746	2746
Габаритная ширина, мм	1226	1226	1226
Максимальная высота, мм	240	60	150
Количество бетонных блоков в ПБЗГУ	36	36	36
Масса, кг	1220	385	793
Высота одной усечённой пирамиды, мм	120	30	120
Высота другой усечённой пирамиды, мм	120	30	30
Габаритные размеры большего общего основания усеченной пирамиды, мм	300x300	300x300	300x300
Габаритные размеры вершины одной усеченной пирамиды, мм	200x200	260x260	200x200
Габаритные размеры вершины другой усеченной пирамиды, мм	200x200	260x260	260x260

Преимуществом ПБЗГУ по сравнению с другими защитными покрытиями, например, сплошными из монолитного железобетона или сборными из железобетонных плит, является простота, высокая

интенсивность и поточность строительно-монтажных работ при применении комплексной механизации. Достоинством ПБЗГУ является также возможность выполнения работ на подводных откосах, независимость от погодных условий, гибкость конструкции, возможность легкого демонтажа всего крепления или замены отдельных плит и многое другое.

Однако крепления, выполненные из ПБЗГУ для защиты земляных откосов берегов водохранилищ, водотоков и водоёмов, работают в сложных условиях, характеризуемых воздействием нерегулярных ветровых волн и разнообразных гидродинамических процессов, возникающих во время штормовых перемещений водных масс над откосами, ледовыми воздействиями, агрессивным влиянием сред, влиянием геотехнических свойств грунтов откосов, геологических и других факторов. Особенно неблагоприятное влияние на работу креплений из ПБЗГУ оказывает действие ледяного покрова водоёма при термическом расширении льда. Это проявляется в зимний период при резком повышении температуры воздуха, что приводит к расширению льда и его давлению на защитное покрытие.

Неблагоприятное влияние на работу креплений откосов оказывает действие ледяного покрова водоёма, проявляющееся в возникновении вырывающих усилий при примерзании ледяного покрова к поверхности крепления и колебаниях уровня воды. Это проявляется в зимний период при регулировании стока водохранилищ, а также в большей степени, во время весеннего паводка.

В неблагоприятных условиях находятся и покрытия береговых откосов, подверженные волновым воздействиям. При этом покрытие откосов испытывает местное динамическое давление от удара струи воды, сбрасываемой с гребня волны при её разрушении в стадии наката волны на откос, и взвешивающее усилие в стадии ската волны с откоса.

В настоящей работе приводятся результаты расчётно-теоретического исследования устойчивости крепления береговых откосов, выполненных из ПБЗГУ, при воздействии ледяного покрова и волновой нагрузки. Работа проведена в соответствии с техническим заданием договора № 73/12-Н, а также нормами и требованиями, изложенными в [5,6,7 и 8].

1.РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЛЕНИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ОТКОСОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПБЗГУ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ТЕРМИЧЕСКИ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ СПЛОШНОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

1.1. Постановка задачи

В настоящем разделе работы приводятся результаты расчетно-теоретического исследования воздействия на крепления берегового откоса, выполненного из ПБЗГУ, от сплошного ледяного покрова при его термическом расширении. Это проявляется в зимний период при резком повышении температуры воздуха, что приводит к расширению льда и его давлению на защитное покрытие.

Очевидно, что характер воздействия ледяного покрова при его температурном расширении существенно зависит от толщины и механических свойств льда, уклона откоса, модели плит ПБЗГУ и их положения на грунте. Поэтому расчеты были проведены при различной толщине ледяного покрова, меняющейся от 0,2 до 1,2м через каждые 0,2м, при трех значениях коэффициента заложения откоса: m = 2,3 и 4.

Плиты ПБЗГУ размещаются на откосе в скрепленном положении. Плиты скрепляются между собой соединительными элементами: связыванием за дополнительные монтажные канаты (ДМК) или свариванием в единое покрытие электродуговой сваркой за закладные детали. В таком виде на устойчивость ПБЗГУ будет влиять сила реакции плит, расположенных под водой, ниже ледяного покрова, зависящая от глубины водоема. Поэтому расчеты выполнены для береговых откосов водоемов различной глубины, меняющейся от 1 до 5м.

При расчетах определялась толщина сплошного ледяного покрова, способного деформировать покрытие из ПБЗГУ при температурном расширении льда.

1.2. Физико-математическое обеспечение задачи

При замерзании вода увеличивает свой объем приблизительно на 9%, но давление ледяного поля в процессе его формирования незначительно. Последующее понижение температуры воздуха приводит к понижению температуры льда и уменьшению его объема, как всякого твердого тела, а повышение температуры – к расширению. При этом, если расширению ледяного поля препятствует противоположный берег, то на покрытие откоса,

смерзшемуся с ледяным полем, будет действовать сила давления от температурного расширения льда:

$$F = K_e \cdot b \cdot h_л \cdot p, \qquad (1.1)$$

где b – ширина фронта соприкосновения льда с покрытием по урезу воды (принимается b = 1м); $h_л$ – толщина льда; p – удельное давление льда; определяемое по СНиП 2.06.04-82 [7]; K_e – коэффициент, снижающий силу давления льда с увеличением протяженности L ледяного покрова в направлении от откоса до противоположного берега, принимаемый по табл.1.1.

Таблица1.1

L, м	50	70	90	120	150 и более
K_e	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Согласно [7] давление P за счет упругой и пластической деформации, МПа, при температурном расширении льда, определяется по формуле

$$P = 0{,}05 + 11 \cdot 10^{-5} \cdot V ή \varphi, \qquad (1.2)$$

где V – максимальная скорость повышения температуры воздуха, ^{0}C/ч за время t, ч. (6 часов при 4 срочных наблюдениях); ή – коэффициент вязкости льда, МПа·ч, определяемый по формулам:

при $t \geq -20^0$C $\quad \eta = (3{,}3 - 0{,}28 t_л + 0{,}083\, t_л^2) \cdot 10^2$; (1.3)

при $t_л \leq -20^0$C $\quad \eta = (3{,}3 - 1{,}85\, t_л) \cdot 10^2$; (1.4)

Здесь $t_л$ – температура льда, ^{0}C, определяется по формуле:

$$t_л = t_в \eta_0 + \frac{\nu \cdot \tau}{2} \cdot \psi, \qquad (1.5)$$

где $t_в$ – начальная температура воздуха, ^{0}C, от которой начинается ее повышение; $ή_0$ – относительная толщина ледяного покрова с учетом влияния снега, определяемая по формуле:

$$\eta_0 = h_л / h_п, \qquad (1.6)$$

где $h_п$ – приведенная толщина снежного покрова, м, определяемая по формуле:

$$h_п = h_л + 1{,}43h_с + \frac{2.3}{\alpha}, \qquad (1.7)$$

где $h_с$ – наименьшая толщина снежного покрова, определяется по данным натурных наблюдений, а при их отсутствии необходимо принимать $h_е = 0$;

α – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности снежного покрова, Вт/м^2, принимаемый равным $23\sqrt{v_в + 0{,}3}$ – при наличии снега, или $6\sqrt{v_в + 0{,}3}$ – при отсутствии снега.

Безразмерные коэффициенты φ и ψ, входящие в формулы (1.2) и (1.5), определяются по графикам рис.1.1 и 1.2 при заданных значениях относительной толщины ледяного покрова $ή_0$ и безразмерной величины $F_0 = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau}{h_п^2}$.

Рассчитанные ледовые нагрузки по формуле (1.1) составляют усилия, действующие в горизонтальном направлении. Нормальная к откосу составляющая от этих нагрузок при угле наклона откоса к горизонту α определяется по формуле:

$$F_н = F \sin \alpha, \qquad (1.8)$$

а продольная нагрузка, действующая вдоль откоса и сдвигающая отдельные элементы защитного покрытия, равна:

$$F_п = F \cos \alpha, \qquad (1.9)$$

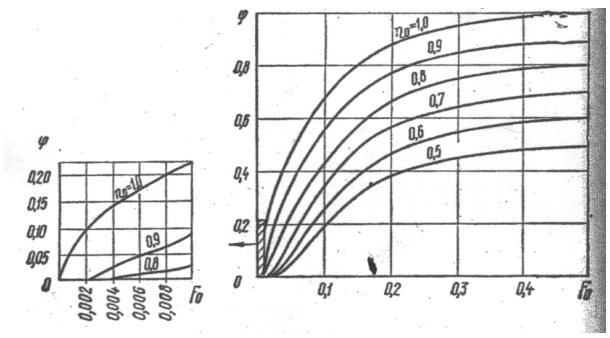

Рис.1.1. Графики значений коэффициента φ

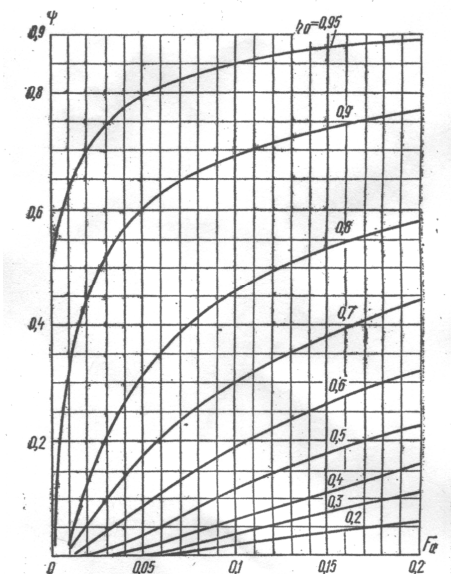

Рис.1.2 Графики значений коэффициента ψ

Если плиты ПБЗГУ укладывается на подготовленный грунт откоса в свободном положении, без соединения между собой, то сила $F_у$, удерживающая элементы покрытия от сдвига, определяется по формуле:

$$F_у = (G + G_л) \operatorname{Sin} \alpha + F_т, \qquad (1.10)$$

где G – вес ПБЗГУ в пределах «смерзшегося массива», $G_л$ – вес льда в пределах «смерзшегося массива»; $F_т$ – сила трения, которая возникает на контакте нижней грани элемента покрытая с поверхностью подстилающей подготовки.

Контактная сила трения определяется с учетом нормальной составляющей силы ледовой нагрузки $F_н$ и суммарной силы тяжести расчетного элемента крепления ПБЗГУ G и веса льда $G_л$ в пределах «смерзшегося массива»:

$$F_т = f\,[(G + G_л) \operatorname{Cos} \alpha + F_н], \qquad (1.11)$$

где f – коэффициент трения покрытия по подстилающему слою подготовки откоса (при контакте ПБЗГУ с крупнообломочным грунтом подготовки откоса f = 0,5-0,6, [11]).

При этом предполагается, что все блоки ПБЗГУ, находящегося в «смерзшемся массиве» равномерно прижимаются к грунтовому основанию, а сила смерзания льда с поверхностью крепления превышает значение внешней силы, приложенной к креплению и вызывающей его деформацию.

Вес ПБЗГУ в пределах, «смерзшегося массива» определяется исходя из границы примерзания льда к покрытию и образования наледи толщиной $h_н = 1{,}2h_л$, по формуле:

$$G = G_м \cdot \frac{h_н \cdot b}{S_м \operatorname{Sin} \alpha}, \qquad (1.12)$$

где $G_м$ и $S_м$ – вес и габаритная площадь одной плиты ПБЗГУ соответствующей модели.

Вес льда в пределах «смерзшегося массива» определяется как произведение объемного веса льда $\gamma_л$ = 920 кг/м^3 на объем «смерзшегося массива», который можно принять равным половине объема прямоугольного параллелепипеда:

$$G_л = \gamma_л \cdot \frac{1}{2} h_н \cdot l \cdot b, \qquad (1.13)$$

где l – длина наледи ($l = mh_н$).

Так как при выполнении покрытия все плиты ПБЗГУ прочно скрепляются между собой соединительными элементами, то в состав удерживающих сил необходимо также включить реактивные силы N_c, возникающие в соединениях плит ПБЗГУ от бетонных блоков, расположенных под водой ниже ледяного покрова:

$$N_c = G_б (\mathrm{Sin}\ \alpha + f\ \mathrm{Cos}\ \alpha), \qquad (1.14)$$

где $G_б$ – вес всех бетонных блоков ПБЗГУ, расположенных под водой с учетом выталкивающей архимедовой силы.

Если предположить, что покрытие уложено на всю ширину откоса, доходящего до дна водоема, в этом случае вес погонного метра ПБЗГУ, находящегося в воде, можно определить по формуле:

$$G_б = (1 - \frac{\gamma_в}{\gamma_б}) \frac{h_в}{S_м} \frac{G_м}{\mathrm{Sin}\alpha}, \qquad (1.15)$$

где $\gamma_в$, $\gamma_б$ – объемный вес воды и бетона соответственно; $h_в$ – глубина воды от нижней кромки льда до дна водоема.

Проверка устойчивости крепления на откосе от сдвигающей силы температурного расширения льда производится по формуле:

$$K = \frac{F_у + N_е}{F_п}, \qquad (1.16)$$

где $K \geq 1$ – коэффициент запаса устойчивости.

1.3. Результаты вычислений и их анализ

При расчете силы давления льда на береговой откос рассмотрен наиболее неблагоприятный случай, когда на ледяном покрове отсутствует снег, т.е. $h_c = 0$. При вычислении коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности ледяного покрова принималась средняя скорость ветра, равная $\nu_в = 5$ м/с.

Максимальная скорость повышения температуры воздуха принята равной 1^0С/ч за время $\tau = 6$ часов, а начальная температура воздуха, от которой начинается ее повышение взята равной $t_в = -20^0$С.

Результаты расчета силы давления льда на береговой откос при различных значениях толщины ледяного покрова приведены в табл.1.2.

При расчете предполагалось, что сплошное ледяное поле обладает достаточно большой длиной в направлении его температурного расширения, L>150м, поэтому коэффициент, снижающий нагрузки, был принят K_e = 0,6.

Таблица1.2

Результаты расчета силы давления льда на береговой откос при его температурном расширении

Толщина ледяного покрова, $h_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Приведенная толщина ледяного покрова, $h_п$, м	0,367	0,567	0,767	0,967	1,167	1,367
Относительная толщина ледяного покрова, η_0	0,545	0,705	0,782	0,827	0,857	0,878
Величина F_0	0,178	0,075	0,041	0,026	0,018	0,013
Коэффициент φ	0,4	0,3	0,2	0,1	0,08	0,06
Коэффициент ψ	0,23	0,25	0,27	0,3	0,33	0,35
Температура льда $t_л$, ^{0}C	-10,2	-13,3	-14,8	-15,6	-16,2	-16,5
Коэффициент вязкости льда, η, МПа·ч	$14{,}8\cdot10^2$	$21{,}7\cdot10^2$	$25{,}6\cdot10^2$	$27{,}9\cdot10^2$	$29{,}6\cdot10^2$	$30{,}5\cdot10^2$
Удельное давление льда, р, МПа	0,115	0,122	0,106	0,081	0,076	0,07
Сила давления льда, F, КН-числитель, тонн - знаменатель	$\frac{13{,}8}{1{,}4}$	$\frac{29{,}3}{2{,}98}$	$\frac{38{,}2}{3{,}89}$	$\frac{38{,}9}{3{,}96}$	$\frac{45{,}6}{4{,}65}$	$\frac{50{,}4}{5{,}13}$

Как видно из таблицы с увеличением толщины ледяного покрова сила давления F при его температурном расширении увеличивается, но это увеличение не пропорционально толщине льда. Это обусловлено снижением удельного давления льда р при увеличении его толщины, так как более тонкий лед быстрее прогревается при увеличении температуры воздуха.

Все плиты ПБЗГУ прочно связываются между собой соединительными канатами, при этом в состав удерживающих сил включаются реактивные силы N_c, возникающие в соединительных элементах ПБЗГУ от бетонных блоков, расположенных под водой ниже ледяного покрова.

Результаты расчетов этих сил по формулам (1.14), (1.15) приведены в табл.1.3. При расчетах принимались следующие значения: $\gamma_в = 1$ т/м^3; $\gamma_б = 2{,}3$ т/м^3; $S_м = 3{,}37$ м^2; $f = 0{,}5$.

Таблица.1.3

Расчетные значения реактивных сил N_c, кг, от бетонных блоков, расположенных под водой

Глубина воды, $h_в$,м	ПБЗГУ модели №1		ПБЗГУ модели №2		ПБЗГУ модели №4	
	m = 2	m = 4	m = 2	m = 4	m = 2	m = 4
1,0	410	615	130	195	267	400
2,0	820	1230	260	390	534	800
3,0	1230	1845	390	585	800	1200
4,0	1640	2460	520	780	1068	1600
5,0	2050	3080	650	975	1335	2000

Как видно из таблицы, значение реактивной силы существенно зависит от заглубления покрытия под воду.

В табл.1.4 приводятся расчетные значения коэффициента запаса устойчивости K, определенные по формуле (1.16) для различных моделей ПБЗГУ.

Анализ данных табл.1.4 показывает, что устойчивость покрытия из ПБЗГУ при воздействии нагрузки от термически расширяющегося ледяного покрова существенно зависит от крутизны защищаемого откоса и заглубления плит под уровень воды. Так для откосов с коэффициентом заложения m > 4, необходимым запасом устойчивости (K > 1) обладает ПБЗГУ модели №1, уложенное на грунт откоса и заглубленное под уровень воды на глубину более 3м, а ПБЗГУ модели №4 – на глубину более 4м. Практически во всем исследованном диапазоне изменения расчетных параметров ПБЗГУ модели №2 не обладает необходимым запасом устойчивости, поэтому эта модель может использоваться для покрытия откосов, не подверженных воздействию термически расширяющегося ледяного покрова.

Таблица 1.4

Расчетные значения коэффициента К запаса устойчивости ПБЗГУ различных моделей, уложенных на откосе m = 2 (числитель) и m = 4 (знаменатель) (с соединением плит между собой)

$h_в$, м	$h_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	0,82 / 0,882	0,675 / 0,668	0,717 / 0,757	0,867 / 0,983	0,941 / 1,1	1,05 / 1,26
	модель №2	0,49 / 0,424	0,47 / 0,383	0,52 / 0,547	0,64 / 0,663	0,716 / 0,743	0,814 / 0,947
	модель №4	0,654 / 0,647	0,571 / 0,522	0,618 / 0,617	0,75 / 0,819	0,826 / 0,936	0,929 / 1,1
2,0	модель №1	1,15 / 1,33	0,828 / 0,88	0,834 / 0,92	0,982 / 1,14	1,04 / 1,24	1,14 / 1,39
	модель №2	0,597 / 0,567	0,519 / 0,451	0,561 / 0,598	0,676 / 0,714	0,747 / 0,824	0,843 / 0,986
	модель №4	0,867 / 0,942	0,671 / 0,661	0,694 / 0,723	0,826 / 0,923	0,89 / 1,02	0,987 / 1,18
3,0	модель№1	1,47 / 1,79	0,982 / 1,09	0,952 / 1,08	1,1 / 1,3	1,14 / 1,37	1,23 / 1,51
	модель №2	0,7 / 0,71	0,568 / 0,518	0,598 / 0,65	0,713 / 0,764	0,779 / 0,868	0,871 / 1,03
	модель№4	1,08 / 1,24	0,771 / 0,799	0,77 / 0,829	0,91 / 1,03	0,954 / 1,11	1,05 / 1,26
4,0	модель№1	1,8 / 2,24	1,14 / 1,31	1,07 / 1,25	1,21 / 1,46	1,24 / 1,51	1,32 / 1,63
	модель №2	0,804 / 0,854	0,617 / 0,586	0,635 / 0,702	0,75 / 0,815	0,81 / 0,911	0,899 / 1,06
	модель №4	1,29 / 1,53	0,871 / 0,937	0,848 / 0,934	0,976 / 1,13	1,02 / 1,2	1,1 / 1,34
5,0	модель №1	2,13 / 2,7	1,29 / 1,51	1,19 / 1,41	1,33 / 1,63	1,34 / 1,65	1,4 / 1,76
	модель №2	0,908 / 0,998	0,666 / 0,653	0,673 / 0,753	0,786 / 0,866	0,841 / 0,954	0,928 / 1,1
	модель №4	1,51 / 1,83	0,972 / 1,08	0,925 / 1,04	1,05 / 1,24	1,08 / 1,29	1,16 / 1,42

1.4.Выводы и предложения

1. Результаты вычислений показали, что в зависимости от крутизны защищаемого откоса и толщины ледяного поля различные модели ПБЗГУ обладают различной сопротивляемостью воздействию ледяного покрова, при его термическом расширении.

2. При выполнении покрытия откоса из ПБЗГУ устойчивость покрытия существенно зависит от глубины заложения плит под уровень воды. При выполнении покрытия на откосе с коэффициентом заложения $m > 4$ ПБЗГУ модели №1 обладает достаточным запасом устойчивости при заглублении плит на глубину $h_в > 3$м, а ПБЗГУ модели №4 – на глубину $h_в > 4$м.

3. ПБЗГУ модели №2 во всем расчетном диапазоне изменения коэффициента откоса $2 \leq m \leq 4$, толщины ледяного покрова $02 \leq h_л \leq 1$м и глубины воды $h_в \leq 5$м не имеет достаточного запаса по устойчивости покрытия от воздействия ледяного покрова при его термическом расширении.

2. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЛЕНИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ОТКОСОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПБЗГУ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ ОТ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ КОЛЕБАНИЯХ УРОВНЯ ВОДЫ В ВОДОЕМЕ

2.1. Постановка задачи

Неблагоприятное влияние на работу креплений из ПБЗГУ оказывает действие ледяного покрова водоема, проявляющееся в возникновении вырывающих усилий при примерзании ледяного покрова к поверхности крепления и колебаниях уровня воды. Это проявляется в зимний период при регулировании стока водохранилищ, а также, в большей степени, во время весеннего паводка. При этом во время ледостава наблюдается смерзание ледяного покрова с элементами покрытия откоса и образование «ледяного припоя», а при повышении горизонта воды во время паводка происходит передача вертикального усилия от гидростатического давления воды через примерзший ледяной покров на защитное покрытие откоса. Это может привести к нарушению устойчивости и прочности защитного покрытия откоса.

В настоящем разделе работы приводятся результаты расчетно-теоретического исследования воздействия ледяного покрова, примерзшего к креплениям берегового откоса, выполненного из ПБЗГУ, при подъеме уровня воды в водоеме. Очевидно, что характер воздействия льда, примерзшего к покрытию ПБЗГУ, способного оторвать бетонные блоки ПБЗГУ от грунта и деформировать покрытие при повышении уровня воды, помимо толщины и механических свойств льда, существенно зависит от уклона откоса, модели ПБЗГУ и его положения на грунте.

Известно, что толщина ледяного покрова в период ледостава непрерывно меняется под влиянием конкретной обстановки (хода температур воздуха, толщины и плотности снеговых отложений, скоростного режима потока воды и др.). Учитывая, что по данным [2] на реках Европейской части и западной Сибири перед их вскрытием толщина ледяного покрова колеблется в пределах от 0,16 до 1,25 м, при средней толщине 0,73 м, расчетные исследования были проведены при различной толщине ледяного покрова, меняющейся от 0,2 до 1,2 м через каждые 0,2м.

Так как защитные покрытие ПБЗГУ рекомендуется применять на откосах с заложением m=2 и более пологих, то расчеты выполнены при трех значениях коэффициента заложения откоса: m=2, 3 и 4.

ПБЗГУ состоит из скрепленных между собой плит. Следовательно, на устойчивость ПБЗГУ будет влиять сила реакции соседних плит и всего

покрытия в целом, зависящая от глубины водоема. Поэтому для этого случая расчеты выполнены для береговых откосов различной глубиной водоема, меняющейся от 1 м до 5 м.

При расчетах определялась толщина ледяного покрова, примерзшего к креплению откоса, способного оторвать бетонные блоки ПБЗГУ от грунта и деформировать покрытие при повышении уровня воды.

2.2. Физико-математическое обеспечение задачи

Деформации ледяного покрова в прибрежной полосе при колебаниях уровня воды вызываются действием внешних сил, которые при наличии достаточно прочных связей по плоскости контакта льда с креплением передаются на откос в виде вырывающих нагрузок.

Механизм воздействия ледяного поля с креплением земляного откоса при изменении уровня воды заключается в следующем. При повышении уровня воды ледяной покров в силу своей плавучести стремится подняться вместе с уровнем воды, однако этому препятствуют усилия, действующие в области примыкания льда к откосу. Вследствие этого ледяное поле подвергается изгибу и в нем возникают внутренние напряжения растяжения $\sigma_{\text{р}}$ и сжатия $\sigma_{\text{с}}$, возрастающие пропорционально изменению уровня воды (рис.2.1). При изменении уровня воды на некоторую величину нормальные напряжения достигают предела прочности льда при изгибе $\sigma_{\text{тр}}$ и $\sigma_{\text{тс}}$, и ледяной покров разрушается. Усилия, действующие в этот момент на крепление откоса, достигают наибольшей величины.

По наблюдениям на различных водохранилищах и каналах при повышении уровня воды вдоль откоса образуется, как правило, одна трещина, проходящая вблизи пересечения нижней поверхности льда с откосом. В некоторых случаях при значительном изменении уровня воды возникает вторая, параллельная линии берега трещина, расположенная в 10 - 15 м от первой. Аналогичные явления наблюдаются в водоемах и при понижении уровня воды.

Образование трещины указывает на действие в плоскости ее сечения значительных изгибающих моментов, скалывающих и продольных усилий. Лед представляет собой анизотропное физическое тело, в зависимости от температуры приобретающее упруго-вязкие свойства со способностью к релаксации напряжений и своеобразным характером их распределения [2].

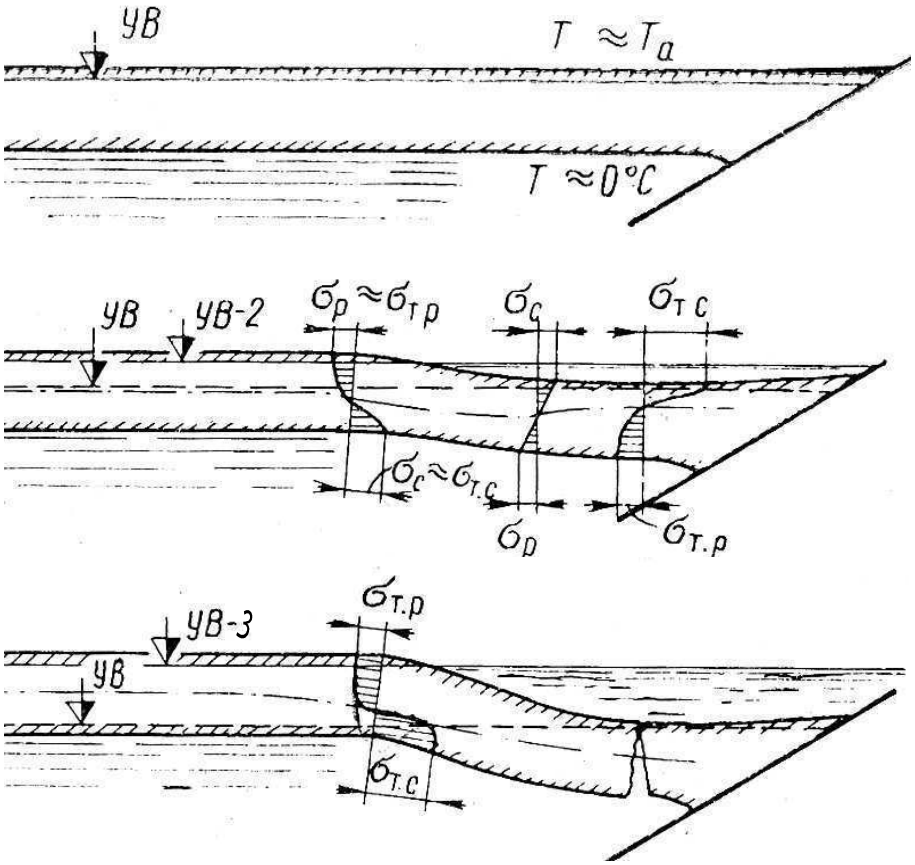

Рис.2.1. Распределение нормальных напряжений в прибрежной зоне ледяного покрова при повышении уровня воды

Характер действия ледяного покрова и деформации крепления, выполненного из плит ПБЗГУ, позволяют определить ледовую нагрузку при колебаниях уровня воды по предельному состоянию льда в плоскости вероятного возникновения в нем первой от берега трещины. Распределение деформаций и напряжений в ледяной консоли, примерзшей к креплению откоса, принимается по схеме рис.2. 1.

Расчетная величина предельного момента внутренних сил в примерзшем к креплению откоса ледяном покрове на стадии его разрушения при медленном изменении положения уровня воды определяется по формуле [4]:

$$M_{пк} = \frac{b\delta_{лк}^2}{2}\frac{\sigma_{рр}\sigma_{рс}}{\sigma_{рр}+\sigma_{рс}}, \qquad (2.1)$$

где b - расчетная длина крепления откоса вдоль линии уреза воды, м, которая при расчетах обычно принимается равной единице; $\delta_{лк}$ - расчетная толщина ледяного покрова, м, равная толщине кристаллического слоя льда;

$\sigma_{рр}$ и $\sigma_{рс}$ - расчетные значения предельных напряжений кристаллического льда, т/м^2, соответственно при растяжении и сжатии.

Толщина кристаллического слоя может быть принята в зависимости от условий образования ледяного покрова в пределах соотношения:

$$\delta_{лк} = (0{,}8 \div 0{,}9)\delta_л\,, \qquad (2.2)$$

где $\delta_л$ толщина ледяного покрова в удалении от берега за пределами наледи.

Расчетные значения предельных напряжений кристаллического льда при растяжении и сжатии принимается в зависимости от температуры среды с учетом уменьшения напряжений во времени (релаксации) по формулам:

$$\sigma_{рр} = \sigma_{тр}K_р\,; \quad \sigma_{рс} = \sigma_{тс}K_р\,, \qquad (2.3)$$

где $K_р$ - коэффициент релаксации; $\sigma_{тр}$ и $\sigma_{тс}$ - пределы прочности (текучести) кристаллического льда соответственно при растяжении и сжатии, принимаемые по табл.2.1, [4]:

Таблица 2.1

Средние пределы прочности естественного льда

Температура льда, ˚С (минус)	Предел прочности, т/м^2	
	на растяжение, $\sigma_{тр}$	на сжатие, $\sigma_{тс}$
Верхняя часть ледяного покрова		
0 - 2	68	184
8 - 10	76	252
20 - 23	108	282
Нижняя часть ледяного покрова		
0 - 2	54	120

Температура среды для нижнего и верхнего слоев льда при подъеме уровня принимается равной температуре воды, то есть около 0 ˚С.

Коэффициент релаксации определяется по формуле [4]:

$$K_р = e^{-\frac{t}{n}}\,, \qquad (2.4)$$

где t - время, час, в течении которого происходит деформация ледяного покрова при понижении или повышение уровня воды на величину, равную толщине льда; n параметр, характеризующий время релаксаций напряжений льда:

$$n = \frac{\mu \cdot 10^3}{E_c}\,. \qquad (2.5)$$

Здесь E_c - статический модуль упругости льда; μ - коэффициент вязкости льда, тч/м^2, определяемый при T< -20˚С по зависимости:

$$\mu = (3{,}3 - 1{,}85T)10^4\,, \qquad (2.6)$$

где T - температура льда, ˚С.

Модуль упругости E_c может быть принят в среднем равным 4·10^5 т/м^3, [4].

Расчетные значения предельного момента определяются по формуле (2.1) при медленных деформациях ледяного покрова, что соответствует $K_р \leq 0{,}8$. Если значения $K_р \geq 0{,}85$, то расчет момента производится по формуле [11]:

$$M_{пх} = \frac{\delta_{лк}^2}{2}\frac{\sigma_{рр}\sigma_{рс}}{\sigma_{рр}+\sigma_{рс}}(1 + 2K_E)\,, \qquad (2.7)$$

где K_E - коэффициент модуля упругости, принимаемый в зависимости от температуры и скорости деформации льда в пределах K_E=1÷2.

Максимальная вертикальная вырывающая сила связана с изгибающим моментом соотношением [3]:

$$P = \sqrt{2}\lambda M_{пх}\,. \qquad (2.8)$$

Здесь

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{\gamma}{D}}\,; \quad D = \frac{E_c\delta_{лк}^3}{12(1-\nu^2)}\,, \qquad (2.9)$$

где D - цилиндрическая жесткость льда; E_c - модуль упругости льда; ν - коэффициент Пуассона; γ - объемный вес воды.

Проверка устойчивости креплений на откосе от изгибающего действия ледяного покрова производится по формуле [11]:

$$K_м = \frac{\Sigma(M_у)_{x_0}}{M_{пх}}\,, \qquad (2.10)$$

где $K_м \geq 1$ - коэффициент запаса устойчивости; $\Sigma(M_у)_{x_0}$ - сумма моментов удерживающих сил относительно вертикального сечения x_0; $M_{пх}$ - крутящий момент, равный сумме моментов предельных внутренних сил в плоскости x, совпадающий с сечением первой (береговой) трещины в ледяном покрове.

При подъеме уровня воды принимается, что x_0 проходит через центр вращения всего «смерзшегося массива», содержащего наледь, крепление и грунт, примерзший к креплению с низовой стороны. Центр вращения в этом

случае находится на пересечении плоскости, лежащей на уровне воды, с плоскостью ограничивающей верх покрытия выше уровня воды (рис.2.2).

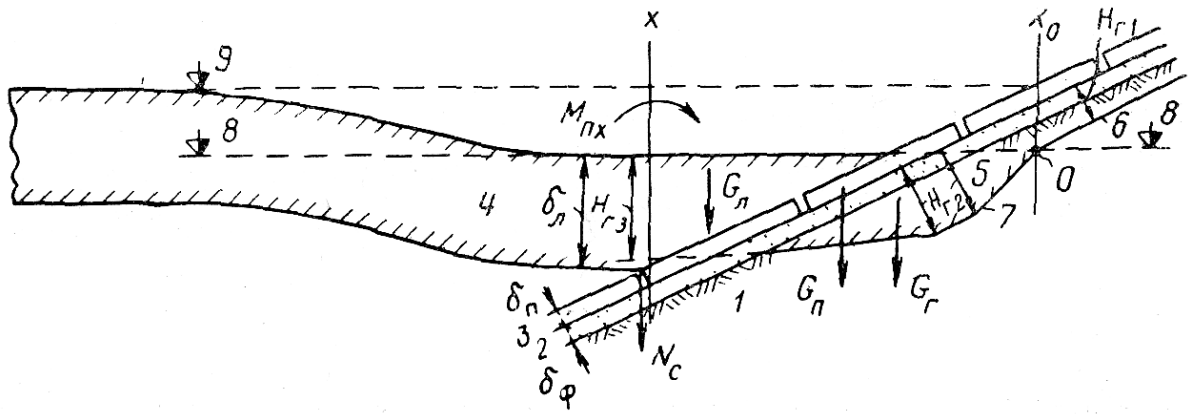

Рис.2.2. Схема сил к расчету устойчивости крепления

при повышении уровня воды

О - центр вращения «смерзшегося массива»; 1 - грунт откоса; 2 - подготовка; 3 - ПБЗГУ; 4 - ледяной покров; 5 - смерзшийся грунт ниже уровня воды; 6 - граница промерзания грунта выше уровня воды; 7 - граница грунта в «смерзшемся массиве»; 8 - уровень воды при ледоставе; 9 - уровень воды при разрушении льда.

Силы, удерживающие крепление, состоят из собственного веса ПБЗГУ $G_п$, веса намерзшего льда $G_л$, и веса $G_г$ примерзшего к ПБЗГУ грунта откоса, то есть веса «смерзшегося массива». При повышении уровня воды и наличии связей между отдельными плитами ПБЗГУ в состав удерживающих сил включаются также реактивные силы N_c, возникающие в соединительных канатах плит ПБЗГУ от бетонных блоков покрытия, расположенных под водой левее сечения x (рис.2.2).

Сумма моментов сил, удерживающих крепление, определяется по формуле:

$$\sum (M_y)_{x_0} = M_{Gx_0} + M_{лx_0} + M_{гx_0} + M_{сx_0}\ , \qquad (2.11)$$

где M_{Gx_0} - момент сил от веса ПБЗГУ $G_п$ относительно сечения x_0; $M_{лx_0}$ - то же от веса наледи $G_л$; $M_{гx_0}$ - то же от веса примерзшего грунта $G_г$; $M_{сx_0}$ - то же, от реактивных сил N_c в связях соединительных канатов.

При подъеме уровня воды все моменты, за исключением $M_{сx_0}$, принимаются полностью в пределах значений $x - x_0$ в предположении, что в этом случае «смерзшийся массив» не деформируется. Кроме того, считается, что сила смерзания льда с поверхностью крепления превышает значение внешней силы, приложенной к креплению и вызывающей его деформацию.

Прочность смерзания льда с поверхностью различных тел зависит от структуры тела, температуры и состояния его поверхности. По данным [11] прочность смерзания льда с поверхностью оштукатуренного бетона достигает 110 Н/см^2.

Удерживающие силы от веса примерзшего грунта $G_г$ устанавливаются исходя из очертания его границы под покрытием (рис.2.2). Нижняя граница примерзшего грунта зависит от многих факторов и должна определяться по известным методам теплотехнических расчетов, приближенно ее можно ограничить плоскостью, проходящей через нижнюю часть ледяного покрова (рис.2.2).

Проверка прочности крепления на откосе от вырывающего действия вертикальной силы производится по формуле:

$$K_р = \frac{P}{G_п + N_с}, \qquad (2.12)$$

где $K_р \geq 1$ - коэффициент запаса прочности покрытия; $G_п$ - вес покрытия в пределах «смерзшегося массива»; N_c - вертикальная сила реакции связи в соединительных канатах.

Дополнительные удерживающие силы от примерзшего к покрытию грунта откоса в данном случае не учитываются.

Вертикальная сила реакции связи в соединительных канатах определяется по формуле:

$$N_с = G_б(\sin\alpha + f\cos\alpha)\sin\alpha, \qquad (2.13)$$

где $G_б$ - вес всех бетонных блоков ПБЗГУ, находящихся под водой с учетом выталкивающей архимедовой силы; α - угол откоса; f - коэффициент трения бетонного блока по подстилающему слою.

Если предположить, что покрытие уложено на всю ширину откоса и доходит до дна водоема, то в этом случае вес погонного метра ПБЗГУ, находящегося в воде, можно определить по формуле:

$$G_б = \left(1 - \frac{\gamma_в}{\gamma_б}\right)\frac{h_в}{S_м}\frac{G_м}{\sin\alpha}, \qquad (2.14)$$

где $\gamma_в$, $\gamma_б$ - соответственно объемный вес воды и бетона; $G_м$, $S_м$ - вес и габаритная площадь одной плиты ПБЗГУ рассматриваемой модели; $h_в$ – расстояние от нижней кромки льда до дна водоема.

2.3. Результаты вычислений и их анализ

При расчетах устойчивости ПБЗГУ на откосе толщина кристаллического слоя льда принималась равной 0,8 от толщины ледяного покрова: $\delta_{лк}$=0,8$\delta_{п}$.

Учитывая, что при повышении уровня воды первая береговая трещина образуется в нижней части ледяного покрова, работающей на растяжение, а верхняя часть ледяного покрова работает при этом на сжатие (рис.2.1), при расчетах предел прочности льда принимался согласно табл.2.1 при температуре 0 ˚С равным: на растяжение $\sigma_{тр}$ =54 т/м^2; на сжатие $\sigma_{тс}$ = 184 т/м^2.

Согласно формуле (2.6) при температуре T = 0˚С коэффициент вязкости льда составляет μ =3,3·10^4 т.ч/м^2, тогда при модуле упругости $E_с$ = 4·10^5 т/м^2 параметр характеризующий время релаксации напряжений льда, согласно [11] равен:

$$n = \frac{3{,}3 \cdot 10^4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^5} = 83 \text{ часа}.$$

Принимая время повышения уровня воды t = 24 часа, получим коэффициент релаксации согласно формуле (2.4) равный:

$$K_р = e^{-\frac{24}{83}} = 0{,}74.$$

Так как полученное значение $K_р$ < 0,8, то происходит медленная деформация ледяного покрова и предельный момент $M_{пх}$ определяется по формуле (2.1). При этом расчетные значения предельных напряжений кристаллического льда принимались равными: $\sigma_{рр}$= 0,74·54 = 40 т/м^2; $\sigma_{рс}$= 0,74·184 = 136 т/м^2. При расчете вертикальной вырывающей силы в формулах (8) и (9) принимались значения: $E_с$ = 4·10^5 т/м^2; ν = 0,3; γ = 1 т/м^3, [2].

Результаты расчета предельного разрушающего момента $M_{пх}$ и предельной вырывающей силы P в зависимости от толщины ледяного покрова приведены в табл. 2.2.

Таблица2.2.

Результаты расчета, предельного разрушающего момента $M_{пх}$

и предельной вырывающей силы P

Толщина ледяного покрова, $\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Толщина кристаллического слоя, $\delta_{лк}$, м	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96
Предельный разрушающий момент, $M_{пх}$, тм	0,395	1,58	3,56	6,33	9,89	14,2
Предельная вырывающая сила, P, т	0,16	0,38	0,634	0,904	1,2	1,5

В табл. 2.3 приведены значения вертикальной силы реакции связи в соединительных канатах, определенные по формулам (2.13) и (2.14). При расчетах принимались следующие значения: $\gamma_в$ = 1 т/м^3; $\gamma_б$ = 2,3 т/м^3; $S_м$ = 3,37 м^2.

Как видно из таблицы вертикальная составляющая силы мало зависит от коэффициента откоса m и существенно изменяется от заглубления покрытия под воду.

В табл. 2.3, 2.4 и 2.5 приводятся расчетные значения моментов от реактивных сил $M_{сх_0}$ и удерживающих моментов $\sum(M_у)_{х_0}$ при различной толщине льда и различном коэффициенте откоса.

Таблица 2.3

Результаты определения вертикальной составляющей силы реакции в соединительных канатах, $N_с$

Глубина воды, $h_в$, м	ПБЗГУ модели №1			ПБЗГУ модели №2			ПБЗГУ модели №4		
	m = 4	m = 3	m = 2	m = 4	m = 3	m = 2	m = 4	m = 3	m = 2
1,0	149	162	183	47	51	58	97	106	119
2,0	298	324	366	94	102	116	194	212	238
3,0	447	487	549	141	154	173	291	317	358
4,0	596	648	732	188	204	232	388	424	476
5,0	745	812	916	235	256	289	485	529	596

На основе данных, приведенных в табл. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 и 2.6, в табл. 2.7, 2.8 и 2.9 приводятся значения коэффициентов запаса прочности $K_р$ и устойчивости $K_м$ для различных моделей ПБЗГУ, определенные по формулам (2.10) и (2.12).

При анализе полученных расчетных данных необходимо учитывать, что при расчетах устойчивости покрытия от изгибающего момента $M_{пх}$ был принят самый неблагоприятный случай расположения бетонных блоков в пределах «смерзшегося массива», а также не учитывалось сопротивление, от мерзлого грунта, расположенного выше уровня воды (рис. 2.2). Исходя из этого, можно считать, что основным фактором, определяющим надежность работы ПБЗГУ при действии ледовых нагрузок, является запас прочности $K_р$ от действия вырывающей силы [7].

Таблица 2.4

Значения моментов реактивных сил M_{cx_0} (числитель)
и суммарного момента $\sum(M_y)_{x_0}$ (знаменатель), тм,
при различной толщине льда, глубине воды и коэффициенте откоса m = 2

$h_в$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	0,088 / 0,144	0,177 / 0,539	0,264 / 1,364	0,351 / 2,82	0,441 / 5,18	0,529 / 8,55
	модель №2	0,028 / 0,068	0,056 / 0,418	0,084 / 1,044	0,112 / 2,342	0,14 / 3,69	0,168 / 7,64
	модель №4	0,057 / 0,105	0,115 / 0,445	0,171 / 1,201	0,228 / 2,58	0,287 / 4,07	0,344 / 8,08
2,0	модель №1	0,176 / 0,232	0,354 / 0,716	0,528 / 1,628	0,702 / 3,17	0,882 / 5,62	1,058 / 9,08
	модель №2	0,056 / 0,096	0,112 / 0,422	0,168 / 1,13	0,224 / 2,45	0,28 / 3,83	0,336 / 7,8
	модель №4	0,114 / 0,162	0,23 / 0,56	0,342 / 1,37	0,456 / 2,81	0,574 / 4,35	0,688 / 8,43
3,0	модель №1	0,264 / 0,32	0,532 / 0,894	0,792 / 1,89	1,05 / 3,52	1,32 / 6,06	1,59 / 9,61
	модель №2	0,084 / 0,124	0,168 / 0,468	0,249 / 1,209	0,332 / 2,56	0,417 / 3,97	0,50 / 7,97
	модель №4	0,172 / 0,22	0,374 / 0,677	0,515 / 1,549	0,687 / 3,04	0,863 / 4,64	1,03 / 8,77
4,0	модель №1	0,352 / 0,408	0,708 / 1,07	1,056 / 2,16	1,404 / 3,87	1,764 / 6,5	2,116 / 10,14
	модель №2	0,112 / 0,152	0,224 / 0,524	0,376 / 1,34	0,448 / 2,68	0,56 / 4,11	0,672 / 8,14
	модель №4	0,288 / 0,276	0,46 / 0,79	0,684 / 1,71	0,912 / 3,26	1,148 / 4,93	1,376 / 9,12
5,0	модель №1	0,440 / 0,496	0,888 / 1,25	1,32 / 2,42	1,76 / 4,23	2,21 / 6,95	2,65 / 10,7
	модель №2	0,139 / 0,179	0,28 / 0,58	0,416 / 1,376	0,555 / 2,78	0,696 / 4,25	0,835 / 8,3
	модель №4	0,286 / 0,334	0,578 / 0,908	0,858 / 1,89	1,14 / 3,49	1,44 / 5,22	1,72 / 9,46

Таблица2.5

Значения моментов реактивных сил M_{cx_0} (числитель)
и суммарного момента $\sum(M_y)_{x_0}$ (знаменатель), тм,
при различной толщине льда, глубине воды и коэффициенте откоса m = 3

$h_в$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	0,116 / 0,236	0,233 / 1,02	0,348 / 2,77	0,465 / 5,96	0,579 / 11,0	0,697 / 18,4
	модель №2	0,036 / 0,125	0,073 / 0,729	0,109 / 2,24	0,146 / 5,13	0,182 / 9,8	0,219 / 16,7
	модель №4	0,076 / 0,181	0,153 / 0,873	0,228 / 2,5	0,304 / 5,54	0,379 / 10,4	0,456 / 17,5
2,0	модель №1	0,232 / 0,352	0,446 / 1,25	0,696 / 3,12	0,93 / 6,43	1,16 / 11,6	1,39 / 19,1
	модель №2	0,072 / 0,161	0,146 / 0,802	0,218 / 2,35	0,292 / 5,27	0,365 / 9,97	0,438 / 16,9
	модель №4	0,152 / 0,257	0,306 / 1,03	0,456 / 2,73	0,608 / 5,84	0,759 / 10,8	0,912 / 18,0
3,0	модель №1	0,349 / 0,469	0,701 / 1,49	1,05 / 3,47	1,4 / 6,9	1,74 / 12,2	2,09 / 19,7
	модель №2	0,11 / 0,199	0,222 / 0,878	0,331 / 2,46	0,442 / 5,42	0,551 / 10,2	0,662 / 17,2
	модель №4	0,227 / 0,332	0,456 / 1,18	0,682 / 2,95	0,91 / 6,14	1,13 / 11,1	1,36 / 18,4
4,0	модель №1	0,49 / 0,61	0,933 / 1,72	1,39 / 3,81	1,86 / 7,36	2,32 / 12,7	2,79 / 20,4
	модель №2	0,146 / 0,235	0,294 / 0,95	0,439 / 2,57	0,585 / 5,57	0,73 / 10,3	0,877 / 17,4
	модель №4	0,304 / 0,409	0,61 / 1,33	0,912 / 3,18	1,28 / 6,45	1,52 / 11,5	1,83 / 18,9
5,0	модель №1	0,582 / 0,702	1,17 / 1,96	1,75 / 4,17	2,33 / 7,83	2,91 / 13,3	3,49 / 21,2
	модель №2	0,183 / 0,272	0,369 / 1,03	0,55 / 2,68	0,735 / 5,72	0,916 / 10,5	1,10 / 17,6
	модель №4	0,379 / 0,484	0,762 / 1,48	1,14 / 3,41	1,52 / 6,75	1,89 / 11,9	2,27 / 19,4

Таблица 2.6

Значения моментов реактивных сил M_{cx_0} (числитель)
и суммарного момента $\sum(M_y)_{x_0}$ (знаменатель), тм,
при различной толщине льда, глубине воды и коэффициенте откоса m = 4

$h_в$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	0,144 / 0,362	0,286 / 1,67	0,429 / 4,71	0,573 / 10,4	0,717 / 19,3	0,86 / 31,7
	модель №2	0,0456 / 0,207	0,0902 / 1,25	0,135 / 3,94	0,181 / 9,12	0,226 / 17,5	0,271 / 29,9
	модель №4	0,094 / 0,283	0,186 / 1,46	0,279 / 4,32	0,373 / 9,75	0,467 / 18,4	0,56 / 31,2
2,0	модель №1	0,288 / 0,506	0,572 / 1,96	0,858 / 5,14	1,15 / 10,9	1,43 / 20,1	1,72 / 32,5
	модель №2	0,091 / 0,253	0,18 / 1,34	0,27 / 4,07	0,362 / 9,3	0,452 / 17,7	0,542 / 30,1
	модель №4	0,188 / 0,377	0,372 / 1,646	0,558 / 4,6	0,746 / 10,1	0,934 / 18,9	1,12 / 31,7
3,0	модель №1	0,434 / 0,652	0,858 / 2,24	1,29 / 5,57	1,72 / 11,5	2,15 / 20,8	2,58 / 33,4
	модель №2	0,137 / 0,299	0,271 / 1,43	0,406 / 4,21	0,543 / 9,48	0,678 / 17,9	0,814 / 30,4
	модель №4	0,282 / 0,471	0,559 / 1,83	0,838 / 4,88	1,12 / 10,5	1,40 / 19,3	1,68 / 32,3
4,0	модель №1	0,576 / 0,794	1,14 / 2,53	1,72 / 6,0	2,29 / 12,1	2,87 / 21,5	3,44 / 34,3
	модель №2	0,182 / 0,344	0,36 / 1,52	0,54 / 4,34	0,724 / 9,66	0,904 / 18,2	1,08 / 30,7
	модель №4	0,376 / 0,471	0,744 / 2,02	1,12 / 5,16	1,49 / 10,9	1,87 / 19,8	2,24 / 32,9
5,0	модель №1	0,723 / 0,941	1,43 / 2,82	2,15 / 6,43	2,87 / 12,7	3,58 / 22,2	4,3 / 35,1
	модель №2	0,228 / 0,39	0,451 / 1,61	0,677 / 4,48	0,905 / 9,85	1,13 / 18,4	1,36 / 30,9
	модель №4	0,470 / 0,659	0,931 / 2,21	1,4 / 5,44	1,87 / 11,3	2,33 / 20,3	2,8 / 33,4

Таблица 2.7

Значения коэффициентов запаса прочности $K_р$ (числитель) и устойчивости $K_м$ (знаменатель) для ПБЗГУ различных моделей, уложенных на откосе m = 2 с соединением плит между собой

$h_ш$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	2,39/0,36	1,51/0,34	1,21/0,38	1,06/0,44	0,96/0,52	0,90/0,60
	модель №2	0,75/0,17	0,48/0,26	0,38/0,29	0,33/0,36	0,31/0,37	0,28/0,54
	модель №4	1,54/0,26	0,98/0,28	0,78/0,34	0,69/0,41	0,63/0,41	0,58/0,57
2,0	модель №1	3,54/0,58	1,99/0,45	1,49/0,46	1,26/0,50	1,12/0,57	1,02/0,64
	модель №2	1,11/0,24	0,63/0,27	0,47/0,32	0,39/0,38	0,35/0,39	0,32/0,55
	модель №4	2,28/0,41	1,29/0,35	0,97/0,38	0,82/0,44	0,72/0,44	0,66/0,59
3,0	модель №1	4,68/0,81	2,47/0,56	1,75/0,53	1,47/0,56	1,27/0,61	1,14/0,68
	модель №2	1,47/0,31	0,78/0,30	0,56/0,34	0,46/0,40	0,40/0,40	0,36/0,56
	модель №4	3,03/0,56	1,61/0,43	1,16/0,43	0,95/0,48	0,82/0,47	0,74/0,62
4,0	модель №1	5,82/1,03	2,95/0,68	2,07/0,61	1,67/0,61	1,421/0,66	1,27/0,71
	модель №2	1,84/0,38	0,93/0,33	0,66/0,38	0,52/0,42	0,45/0,42	0,40/0,57
	модель №4	3,77/0,70	1,92/0,50	1,35/0,48	1,09/0,52	0,92/0,50	0,82/0,64
5,0	модель №1	6,97/1,25	3,44/0,79	2,36/0,68	1,87/0,66	1,57/0,70	1,39/0,75
	модель №2	2,19/0,45	1,08/0,37	0,75/0,38	0,58/0,44	0,50/0,43	0,44/0,58
	модель №4	4,52/0,84	2,24/0,57	1,54/0,53	1,22/0,55	1,02/0,53	0,90/0,67

Таблица 2.8

Значения коэффициентов запаса прочности $K_р$ (числитель) и устойчивости $K_м$ (знаменатель) для ПБЗГУ различных моделей, уложенных на откосе m = 3 с соединением плит между собой

$h_ш$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	2,73/0,60	1,87/0,64	1,56/0,78	1,40/0,94	1,28/1,11	1,21/1,30
	модель №2	0,86/0,32	0,59/0,46	0,49/0,63	0,44/0,81	0,40/0,99	0,38/1,18
	модель №4	1,75/0,46	1,22/0,55	1,01/0,70	0,91/0,88	0,83/1,05	0,78/1,23
2,0	модель №1	3,74/0,89	2,30/0,79	1,81/0,88	1,57/1,02	1,41/1,17	1,31/1,34
	модель №2	1,18/0,41	0,73/0,51	0,57/0,66	0,49/0,83	0,45/1,01	0,41/1,19
	модель №4	2,44/0,65	1,50/0,65	1,18/0,77	1,02/0,92	0,92/1,09	0,85/1,27
3,0	модель №1	4,76/1,18	2,72/0,94	2,07/0,96	1,75/1,09	1,55/1,23	1,42/1,39
	модель №2	1,50/0,50	0,86/0,55	0,69/0,69	0,55/0,86	0,49/1,03	0,45/1,21
	модель №4	3,09/0,84	1,78/0,75	1,34/0,83	1,14/0,97	1,01/1,12	0,92/1,29
4,0	модель №1	5,77/1,54	3,15/1,09	2,32/1,07	1,93/1,16	1,68/1,28	1,53/1,44
	модель №2	1,82/0,59	0,99/0,60	0,73/0,72	0,61/0,88	0,53/1,04	0,48/1,22
	модель №4	3,76/1,03	2,05/0,84	1,51/0,89	1,26/1,02	1,10/1,16	0,99/1,33
5,0	модель №1	6,79/1,78	3,58/1,24	2,58/1,17	2,11/1,24	1,82/1,34	1,64/1,49
	модель №2	2,14/0,67	1,13/0,65	0,81/0,75	0,67/0,90	0,57/1,06	0,52/1,24
	модель №4	4,42/1,22	2,33/0,94	1,68/0,96	1,38/1,07	1,18/1,20	1,07/1,36

Таблица 2.9

Значения коэффициентов запаса прочности $K_р$ (числитель) и устойчивости $K_м$ (знаменатель) для ПБЗГУ различных моделей, уложенных на откосе m = 4 с соединением плит между собой

$h_ш$, м	$\delta_л$, м	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
1,0	модель №1	3,19/0,92	2,28/1,06	1,88/1,32	1,70/1,64	1,58/1,95	1,49/2,23
	модель №2	1,19/0,52	0,72/0,79	0,59/1,10	0,54/1,44	0,50/1,77	0,47/2,10
	модель №4	2,08/0,72	1,48/0,92	1,22/1,21	1,11/1,54	1,02/1,86	0,97/2,20
2,0	модель №1	4,12/1,28	2,67/1,24	2,11/1,44	1,87/1,72	1,70/2,03	1,59/2,29
	модель №2	1,49/0,64	0,84/0,85	0,67/1,14	0,59/1,47	0,54/1,79	0,50/2,12
	модель №4	2,69/0,95	1,74/1,04	1,37/1,29	1,22/1,60	1,10/1,91	1,03/2,23
3,0	модель №1	5,05/1,65	3,06/1,42	2,35/1,56	2,04/1,82	1,82/2,10	1,69/2,35
	модель №2	1,78/0,76	0,96/0,91	0,74/1,18	0,64/1,50	0,58/1,81	0,53/2,14
	модель №4	3,29/1,19	1,99/1,16	1,53/1,37	1,32/1,66	1,18/1,95	1,10/2,27
4,0	модель №1	5,98/2,01	3,45/1,60	2,58/1,68	2,02/1,91	1,95/2,17	1,79/2,42
	модель №2	2,07/0,87	1,09/0,96	0,815/1,22	0,69/1,53	0,61/1,84	0,56/2,16
	модель №4	3,90/1,19	2,25/1,28	1,68/1,45	1,43/1,72	1,27/2,01	1,16/2,32
5,0	модель №1	6,92/2,38	3,84/1,78	2,82/1,81	2,37/2,01	2,07/2,24	1,88/2,47
	модель №2	2,37/0,99	1,21/1,02	0,89/1,26	0,75/1,56	0,65/1,86	0,60/2,18
	модель №4	4,50/1,67	2,50/1,40	1,83/1,53	1,54/1,78	1,35/2,05	1,23/2,35

Анализ данных табл. 2.7, 2.8 и 2.9 показывает, что величина нагрузки от примерзшего к ПБЗГУ ледяного покрова при повышении уровня воды существенно зависит от крутизны защищаемого откоса. Так для откоса с коэффициентом m=2 достаточным запасом прочности $K_р$ > 1 и устойчивости $K_м$ > 1 обладают только покрытия из ПБЗГУ модели №1, уложенное на грунт откоса с соединением плит между собой и заглубленное под уровень воды на глубину более 4 м. На пологом откосе с коэффициентом m =4 ПБЗГУ этой модели практически во всем исследованном диапазоне параметров толщины ледяного покрова и глубины водоема обладает достаточной прочностью и устойчивостью.

Как видно из таблиц наиболее подверженными воздействию ледяного покрова являются покрытия из ПБЗГУ модели №2. Эта модель обладает одновременно небольшими запасами прочности и устойчивости только при расположении на пологом откосе m = 4, при достаточно большом заглублении под уровень воды h > 4м и толщине ледяного покрова $\delta_л$ ≤ 0,4 м.

В связи с недостаточной устойчивостью ПБЗГУ модели №2 был рассмотрен вариант расположения этой модели на грунте откоса со смещением плит на 1/3 длины блока по его основанию. При этом увеличивается сопротивляемость полотна изгибу за счет реакции соседних плит.

Максимальная величина дополнительного момента сопротивления разрушающему моменту может быть определена по формуле:

$$M_{сопр} = \frac{bh^2}{2}\frac{\sigma_с \sigma_р}{\sigma_с + \sigma_р}, \qquad (2.15)$$

где b = 1 м - расчетная длина фронта крепления; h - расчетная толщина ПБЗГУ; $\sigma_с$ и $\sigma_р$ - предел прочности бетона при сжатии и растяжении соответственно.

Учитывая, что толщина соединительного каната плит ПБЗГУ составляет 8 - 25 мм, а толщина блока ПБЗГУ модели №2 равна 60 мм, примем h ≈ 50 мм. Принимая для бетона $\sigma_р$ = 250 т/м^2 и $\sigma_с$ = 2800 т/м^2 получим:

$$M_{сопр} = \frac{1 \cdot 0{,}05^2}{2}\frac{2800 \cdot 250}{2800 + 250} = 0{,}286 \text{ тм}.$$

Сравнивая полученное значение с предельным разрушающим моментом $M_{пх}$ (табл.2.2) можно заключить, что полученный дополнительный момент сопротивления не обеспечивает необходимого запаса устойчивости даже при толщине ледяного покрова $\delta_л$ ≤ 0,2 м.

2.4. Выводы и предложения

1. Результаты вычислений показали, что в зависимости от крутизны защищаемого откоса различные модели ПБЗГУ обладают различной сопротивляемостью воздействию примерзшего ледяного покрова при повышении уровня воды. Наибольшей сопротивляемостью обладает модель ПБЗГУ №1, которая имеет достаточный запас прочности и устойчивости при защите пологого откоса с коэффициентом $m \geq 4$.

2. Наименьшей сопротивляемостью обладает модель ПБЗГУ №2, которая обладает небольшими запасами прочности и устойчивости только при расположении на пологом откосе $m \geq 4$, при достаточно большом заглублении под уровень воды h > 4м и толщине ледяного покрова $\delta_л \leq 0{,}4$ м.

3. Размещение ПБЗГУ модели №2 на откосе со сдвигом плит относительно друг друга на 1/3 длины бетонного блока незначительно увеличивает запас всего покрытия от воздействия ледовой нагрузки.

4. Для повышения прочности и устойчивости ПБЗГУ, очевидно, более целесообразно размещать в зоне ледяного припая ПБЗГУ модели №1, а в зонах выше и ниже ледяного покрова – ПБЗГУ модели №2.

3. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПЛЕНИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ОТКОСОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ПБЗГУ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ

3.1. Постановка задачи

В настоящем разделе работы приводятся результаты расчетно-теоретического исследования устойчивости крепления берегового откоса, выполненного из ПБЗГУ, при воздействии волновой нагрузки. Известно, что высота волны расчетной обеспеченности зависит от многих факторов: скорости ветра, продолжительности его действия, разгона волн и глубины водоема [7, 9, 11]. Принимая во внимание, что на внутренних водоемах и водохранилищах высота волн не превышает 4м, а пологость волн $8 < \lambda/h < 14$ [9, 11] расчеты были проведены при различной высоте волны, меняющейся от 1 до 4м и среднем значении $\lambda/h = 10$.

Расчеты были проведены для различных моделей ПБЗГУ, уложенных на откосе с коэффициентом заложения, меняющемся от $m = 2$ до $m = 8$.

Все расчеты выполнены с использованием рекомендаций, изложенных в [5, 6, 7, 8].

3.2. Физико-математическое обеспечение задачи

Ветровые волны возникают на поверхности воды под воздействием ветра. Волны характеризуются следующими параметрами (рис. 3.1). Часть волны, расположенная выше статистического уровня воды, называется гребнем волны, а самая высокая точка гребня – вершиной волны.

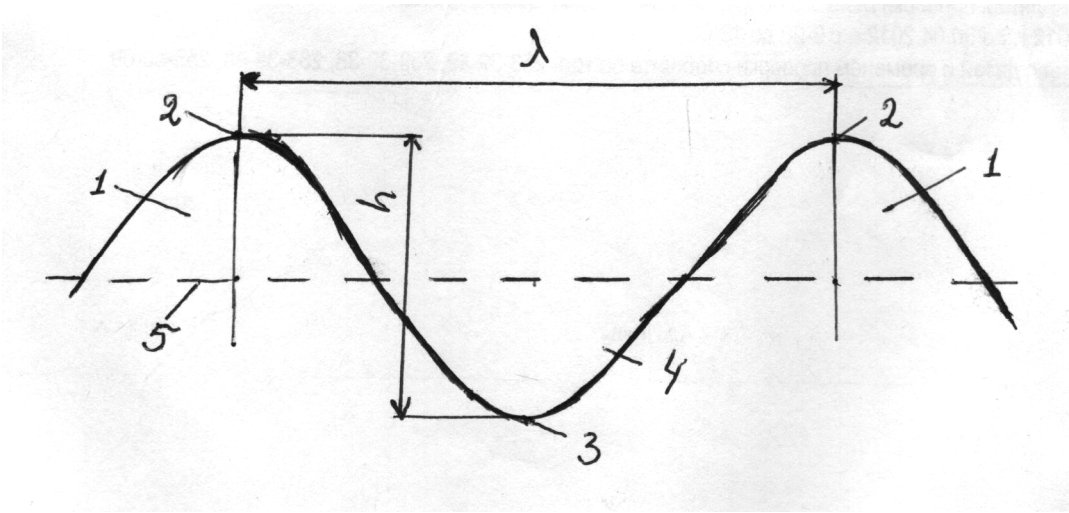

Рис.3.1. Элементы ветровой волны

1 – гребень; 2 – вершина; 3 – подошва; 4 – впадина; 5 – статический уровень воды

Между двумя гребнями ниже статического уровня воды находится впадина с низкой точкой – подошвой волны. Превышение вершины над подошвой есть высота волны h. Длина волны λ – горизонтальное расстояние между двумя смежными вершинами или подошвами. Отношение высоты волны к ее длине h/λ называют крутизной волны, а обратная величина λ/h – пологостью волны.

На условия распространения и параметры волн значительное влияние оказывает глубина воды в водоеме H. В связи с этим в водоемах различают участки глубоководные $H > H_{кр}$ и мелководные $H \leq H_{кр}$, где $H_{кр}$ – критическая глубина.

На подходе к критической глубине крутизна волны увеличивается, достигая предельной величины, и ее гребень теряет устойчивость.

На основании экспериментальных и натурных исследований установлено, что накатывающаяся на откос волна меняет форму и размеры. После выхода на критическую глубину она достигает предельного состояния по высоте, длине и запасам энергии. Потом начинается процесс ее разрушения. Опытами установлено, что волны полностью разрушаются на откосе, если угол наклона его к горизонтальной плоскости $\alpha < 45^0$, [1, 9].

Достигнув предельного состояния – максимальной высоты подъема частиц воды на гребне до y_0, волна обрушивается на откос в виде свободно падающей струи и ударяется об откос вблизи точки B (рис. 3.2). После этого начитается растекание заключенной в волне массы воды вверх и вниз по откосу, причем максимальная высота наката волны на откос $h_н$, отсчитываемая от статистического уровня воды, зависит от высоты h, крутизны h/λ волны и коэффициента заложения откоса m.

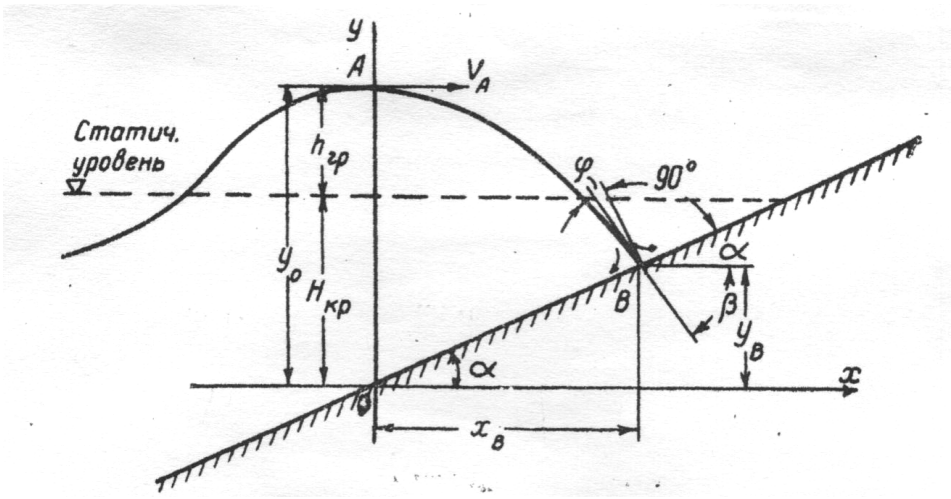

Рис. 3.2. Схема обрушения ветровой волны на откосе

Параметры волны, достигшей предельного состояния, являются исходными для определения волновых воздействий на откос.

Критическая глубина $H_{кр}$, на которой происходит разрушение волны, определяется по формуле, [5,9] :

$$H_{кр} = h\left(0{,}47 + 0{,}023\frac{\lambda}{h}\right)\frac{1+m^2}{m^2} \quad , \tag{3.1}$$

Горизонтальная проекция начальной скорости струи, сбрасываемой с гребня волны в точке А,

$$\nu_A = n\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}th\frac{2\pi H_{кр}}{\lambda}} + h\sqrt{\frac{\pi g}{2\lambda}Cth\frac{2\pi H_{кр}}{\lambda}} \quad , \tag{3.2}$$

где эмпирический коэффициент n вычисляется по формуле

$$n = 4{,}7\frac{h}{\lambda} + 3{,}4\left(\frac{m}{\sqrt{1+m^2}} - 0{,}85\right). \tag{3.3}$$

Координаты точки В (рис. 3. 2) определяются уравнениями:

$$y_B = X_B / m \quad , \tag{3.4}$$

$$X_B = \left[\nu_A\sqrt{\frac{\nu_A^2}{m^2} + 2gy_0} - \frac{\nu_A^2}{m}\right]\frac{1}{g} \quad , \tag{3.5}$$

где y_0 – ордината точки А, характеризующая положение струи в начальный момент сброса ее с гребня волны:

$$y_0 = H_{кр} + h_{гр} \ , \tag{3.6}$$

где $h_{гр}$ – возвышение точки А над статическим уровнем воды (рис. 3.2), определяемая по уравнению [5, 9]:

$$h_{гр} = \left[0{,}95 - (0{,}84m - 0{,}25)h/\lambda\right]\cdot h \quad . \tag{3.7}$$

Максимальная скорость струи при ударе ее об откос, наблюдающееся в точке В, определяется по формуле:

$$\nu_B = \sqrt{\eta\left[\nu_A^2 + \left(\frac{gx_B}{\nu_A}\right)^2\right]} \quad , \qquad (3.8)$$

где X_B – определяется по формуле (3.5); ν_A – определяется по формуле (3.2); η – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости при растекании струи в скатывающемся потоке:

$$\eta = 1 - (0{,}017 \cdot m - 0{,}02) \cdot h \, . \qquad (3.9)$$

Максимальное местное давление P_{Bmax} на откос от удара струи в точке В в момент обрушения волны определяется по формуле [5, 9]:

$$P_{Bmax} = 1{,}7 \cdot \gamma \frac{\nu_A^2}{2g} \cos^2 \varphi \quad , \qquad (3.10)$$

где φ – угол между касательной к направлению струи в точке В и нормалью к откосу, равный:

$$\varphi = 90^0 - (\alpha + \beta) \, . \qquad (3.11)$$

Здесь α – угол наклона откоса к горизонту; β – абсолютное значение угла между касательной к направлению струи в точке В и горизонталью (рис.3.2), вычисляемое по уравнению:

$$tg\beta = g \, {}^{X_в}\!/_{\nu_A^2} \, , \qquad (3.12)$$

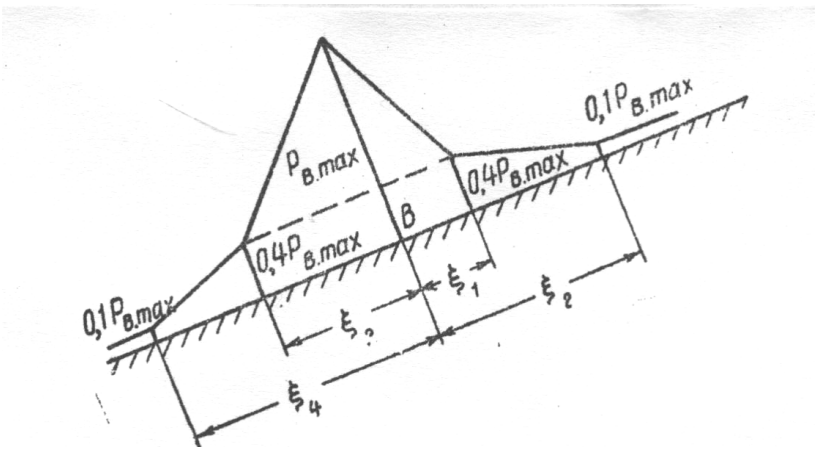

Рис. 3.3. Эпюра волнового давления на откос в момент удара волны

Эпюра волнового давления на откос (рис. 3.3) строится по точкам с давлением P_{Bmax} и с давлениями, вычисленными для расстояний от точки В

вверх до точек ξ_1 и ξ_2 и вниз до точек ξ_3 и ξ_4, имеющими соответственно значения $0{,}4P_{Bmax}$ и $0{,}1\ P_{Bmax}$

Эти расстояния по откосу равны, [5]:

$$\xi_1 = 0{,}025L; \quad \xi_3 = 0{,}053L;$$

$$\xi_2 = 0{,}065L; \quad \xi_4 = 0{,}135L\ ,$$

где
$$L = \frac{m\lambda}{2\sqrt[4]{m^2 - 1}} \qquad (3.13)$$

Среднее значение нормальной составляющей силы, действующей на некоторую площадь поверхности S и прижимающую защитное покрытие к откосу, можно определить по формуле:

$$F_н = P_{ср} \cdot S\ , \qquad (3.14)$$

где $P_{ср}$ – среднее значение давления на данную площадь, определяемое по эпюре, изображенной на рис. 3.3, S – площадь покрытия, подверженная активному волновому воздействию.

Среднее давление можно определить по формуле:

$$P_{ср} = 0{,}5P_{Bmax}\left[0{,}5 + 0{,}9\frac{(\xi_1 + \xi_3)}{(\xi_2 + \xi_4)}\right], \qquad (3.15)$$

а площадь активного воздействия волны, на единицу ширины покрытия вдоль линии уреза воды в = 1м, равна:

$$S = (\xi_2 + \xi_4)в = \xi_2 + \xi_4 \qquad (3.16)$$

Средняя продольная сила, действующая вдоль откоса и сдвигающая отдельные элементы защитного покрытия, равна:

$$F_п = F_н \mathrm{tg}\varphi. \qquad (3.17)$$

Сила, удерживающая элементы покрытия в пределах площади активного воздействия волны, определяется по формуле:

$$F_y = G_в \mathrm{Sin}\alpha + f(G_в Cos\alpha + F_н)\ , \qquad (3.18)$$

где $G_в$ – вес всех бетонных блоков ПБЗГУ, расположенных в пределах зон активного воздействия волны, с учетом выталкивающей архимедовой силы; f – коэффициент трения покрытия по подстилающему слою подготовки откоса, принимаемый равным 0,5 ÷ 0,6, [11].

Вес ПБЗГУ в пределах зоны активного воздействия волны определяется исходя из границы площади S по формуле:

$$G_B = \mathrm{G_m} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_в}{\gamma_б}\right) \frac{(\xi_2 - \xi_4)}{\mathrm{S_m}} \ , \qquad (3.19)$$

где G_m и S_m – вес и габаритная площадь одной плиты ПБЗГУ соответствующей модели; $\gamma_в$, $\gamma_б$ – объемный вес воды и бетона соответственно.

Так же в состав удерживающих сил необходимо включать реактивные силы N_c, возникающие в соединительных канатах ПБЗГУ от бетонных блоков покрытия, расположенного ниже зоны активного воздействия волны:

$$N_c = G_б (\mathrm{Sin}\alpha + \mathrm{f Cos}\alpha) \ , \qquad (3.20)$$

где $G_б$ – вес всех бетонных блоков ПБЗГУ, расположенных под водой ниже зоны активного воздействия волны, определяемый по формуле:

$$G_б = \left(1 - \frac{\gamma_в}{\gamma_б}\right) \mathrm{G_m} \frac{l_н}{\mathrm{S_м}} \ . \qquad (3.21)$$

Здесь $l_н$ – протяженность покрытия, расположенного ниже зоны активного воздействия волны, определяемая по формуле:

$$l_н = \frac{H_н + y_в - H_{кр}}{\mathrm{Sin}\alpha} - \xi_4 \ , \qquad (3.22)$$

где $H_н$ – глубина нижней границы крепления откоса под водой.

По рекомендациям [1,11] нижняя граница крепления должна располагаться на глубине не выше двух высот волны расчетной обеспеченности.

Проверка устойчивости крепления на откосе от волнового воздействия производится по формуле:

$$K = \frac{\mathrm{F_у} + \mathrm{N_c}}{\mathrm{F_п}} \ , \qquad (3.23)$$

где $K \geq 1$ – коэффициент запаса устойчивости.

3.3. Результаты вычислений и их анализ

Результаты расчета основных параметров воздействия потока на береговой откос при различных значениях высоты волны h и коэффициента заложения откоса m, полученные по изложенной выше методике, приведены в табл. 3.1, 3.2, 3.3 и 3.4.

Как видно из этих таблиц, с ростом коэффициента заложения откоса m, т.е. с уменьшением крутизны откоса площадь активного воздействия волны S увеличивается, а среднее давление на откос уменьшается, так что нормальная составляющая силы волнового давления $F_н$ мало меняется с изменением крутизны откоса. При этом продольная сила волнового давления $F_п$, сдвигающая покрытие ПБЗГУ, с уменьшением крутизны откоса значительно увеличивается. Это связано с тем, что при увеличении коэффициента заложения откоса m значительно увеличивается угол φ между направлением струи и нормалью к откосу.

В табл. 3.5 приведены расчетные значения сил, удерживающих ПБЗГУ на откосах, а в табл. 3.6 коэффициент запаса устойчивости ПБЗГУ различной модели, уложенного на откос с соединением плит между собой. При расчетах принимались следующие значения: $\gamma_в$ = 1т/м^3; $\gamma_б$ = 2,3 т/м^3; $S_м$ = 3,37м^3; $G_м$: модель №1 – 1,22т; модель №2 – 0,385т; модель №4 – 0,793т.

При вычислении реактивной силы N_c глубина нижней границы крепления откоса под водой принималась равной двум высотам волны.

Как видно из табл.3.6, при защите береговых откосов ПБЗГУ с соединением плит между собой, практически все модели в рассмотренном диапазоне изменения высоты волны и коэффициента заложения откоса имеют K > 1. Только при достаточно пологих откосах m ≥ 8 ПБЗГУ модели №2 не обладает необходимым запасом устойчивости от волнового воздействия.

Таблица 3.1

Расчетные параметры воздействия волнового потока на покрытие откоса с коэффициентом заложения m = 2, ($\alpha = 26{,}5^0$)

Высота волны, h, м		1	2	3	4
Критическая глубина, $H_{кр}$, м		0,88	1,75	2,62	3,5
Горизонтальная проекция начальной скорости, v_A, м/с		3,49	4,94	6,05	6,99
Возвышение гребня волны над статическим уровнем воды, $h_{гр}$, м		0,81	1,61	2,42	3,22
Ордината вершины гребня волны, y_0, м		1,68	3,36	5,05	6,72
Координаты точки, максимального давления волны на откос	X_B, м	1,51	3,03	4,55	6,06
	$У_B$, м	0,75	1,5	2,27	3,03
Максимальная скорость при ударе струи об откос, v_B, м/с		5,46	7,67	9,34	10,7
Коэффициент, учитывающий уменьшение скорости, η		0,986	0,972	0,958	0,944
Угол между касательной к направлению струи и горизонталью, β, град		50	50	50	50
Угол между направлением струи и нормалью к откосу, φ, град		12,9	12,9	12,9	12,9
Максимальное давление на откос, P_B, т/м^2		2,45	4,84	7,18	9,42
Расстояния воздействия волны на откос, м	L	7,6	15,2	22,8	30,4
	ξ_1	0,19	0,38	0,57	0,76
	ξ_2	0,494	0,988	1,48	1,98
	ξ_3	0,403	0,806	1,21	0,61
	ξ_4	1,03	2,05	3,08	4,1
Площадь активного воздействия волны, S, м^2		1,52	3,04	4,56	6,08
Среднее давление на откос, $P_{ср}$, т/м^2		1,04	2,06	3,06	4,34
Нормальная составляющая силы волнового давления на покрытие из ПБЗГУ, $F_н$, т		1,58	6,26	13,9	26,4
Продольная сила волнового давления, сдвигающая ПБЗГУ, $F_п$, т		0,352	1,28	2,85	5,42

Таблица 3.2

Расчетные параметры воздействия волнового потока на покрытие откоса с коэффициентом заложения m = 3, ($\alpha = 18{,}4^0$)

Высота волны, h, м		1	2	3	4
Критическая глубина, $H_{кр}$, м		0,78	1,55	2,33	3,1
Горизонтальная проекция начальной скорости, v_A, м/с		3,99	5,64	6,9	7,97
Возвышение гребня волны над статическим уровнем воды, $h_{гр}$, м		0,72	1,45	2,17	2,89
Ордината вершины гребня волны, y_0, м		1,5	3,0	4,5	5,99
Координаты точки, максимального давления волны на откос	X_B, м	1,73	3,46	5,18	6,91
	$У_B$, м	0,58	1,15	1,73	2,3
Максимальная скорость при ударе струи об откос, v_B, м/с		5,74	7,99	9,61	10,9
Коэффициент, учитывающий уменьшение скорости, η		0,969	0,938	0,907	0,876
Угол между касательной к направлению струи и горизонталью, β, град		46,8	46,8	46,8	46,8
Угол между направлением струи и нормалью к откосу, φ, град		24,8	24,8	24,8	24,8
Максимальное давление на откос, P_B, т/м^2		2,35	4,56	6,59	8,48
Расстояния воздействия волны на откос, м	L	8,92	17,8	26,7	35,7
	ξ_1	0,22	0,45	0,67	0,89
	ξ_2	0,58	1,16	1,74	2,32
	ξ_3	0,47	0,94	1,42	1,89
	ξ_4	1,2	2,4	3,6	4,82
Площадь активного воздействия волны, S, м^2		1,78	3,56	5,34	7,14
Среднее давление на откос, $P_{ср}$, Т/м^2		0,997	1,94	2,81	3,61
Нормальная составляющая силы волнового давления на покрытие из ПБЗГУ, $F_н$, т		1,77	6,91	15,0	25,8
Продольная сила волнового давления, сдвигающая ПБЗГУ, $F_п$, т		0,727	2,84	6,15	10,6

Таблица 3.3

Расчетные параметры воздействия волнового потока на покрытие откоса с коэффициентом заложения m = 4, ($\alpha = 14^0$)

Высота волны, h, м		1	2	3	4
Критическая глубина, $H_{кр}$, м		0,74	1,48	2,22	2,96
Горизонтальная проекция начальной скорости, v_A, м/с		4,17	5,9	7,23	8,35
Возвышение гребня волны над статическим уровнем воды, $h_{гр}$, м		0,64	1,28	1,92	2,56
Ордината вершины гребня волны, y_0, м		1,38	2,76	4,14	5,52
Координаты точки, максимального давления волны на откос	X_B, м	1,81	3,63	5,44	7,26
	$У_B$, м	0,45	0,91	1,36	1,82
Максимальная скорость при ударе струи об откос, v_B, м/с		5,82	8,02	9,56	10,7
Коэффициент, учитывающий уменьшение скорости, η		0,952	0,904	0,856	0,808
Угол между касательной к направлению струи и горизонталью, β, град		45,6	45,6	45,6	45,6
Угол между направлением струи и нормалью к откосу, φ, град		30,4	30,4	30,4	30,4
Максимальное давление на откос, P_B, т/м^2		2,18	4,14	5,88	7,37
Расстояния воздействия волны на откос, м	L	10,2	20,3	30,5	40,6
	ξ_1	0,25	0,51	0,76	1,02
	ξ_2	0,66	1,32	1,98	2,64
	ξ_3	0,54	1,08	1,62	2,15
	ξ_4	1,38	2,74	4,12	5,48
Площадь активного воздействия волны, S, м^2		2,04	4,06	6,1	8,12
Среднее давление на откос, $P_{ср}$, т/м^2		0,925	1,76	2,5	3,14
Нормальная составляющая силы волнового давления на покрытие из ПБЗГУ, $F_н$, т		1,89	7,15	15,2	25,5
Продольная сила волнового давления, сдвигающая ПБЗГУ, $F_п$, т		0,978	3,7	7,86	13,2

Таблица 3.4

Расчетные параметры воздействия волнового потока на покрытие откоса с коэффициентом заложения m = 8, ($\alpha = 7{,}12^0$)

Высота волны, h, м		1	2	3	4
Критическая глубина, $H_{кр}$, м		0,71	1,42	2,13	2,84
Горизонтальная проекция начальной скорости, v_A, м/с		4,36	6,16	7,54	8,71
Возвышение гребня волны над статическим уровнем воды, $h_{гр}$, м		0,3	0,61	0,91	1,21
Ордината вершины гребня волны, y_0, м		1,01	2,03	3,04	4,05
Координаты точки, максимального давления волны на откос	X_B, м	1,75	3,51	5,26	7,01
	$У_B$, м	0,22	0,44	0,66	0,88
Максимальная скорость при ударе струи об откос, v_B, м/с		5,52	7,29	8,22	8,61
Коэффициент, учитывающий уменьшение скорости, η		0,884	0,768	0,652	0,536
Угол между касательной к направлению струи и горизонталью, β, град		42,2	42,2	42,2	42,2
Угол между направлением струи и нормалью к откосу, φ, град		40,7	40,7	40,7	40,7
Максимальное давление на откос, P_B, т/м^2		1,52	2,64	3,36	3,69
Расстояния воздействия волны на откос, м	L	14,2	28,4	42,6	56,8
	ξ_1	0,36	0,71	1,06	1,42
	ξ_2	0,92	1,85	2,76	3,69
	ξ_3	0,75	1,51	2,26	3,01
	ξ_4	1,92	3,84	5,75	7,67
Площадь активного воздействия волны, S, м^2		2,84	5,69	8,51	11,36
Среднее давление на откос, $P_{ср}$,т/м^2		0,647	1,12	1,43	1,57
Нормальная составляющая силы волнового давления на покрытие из ПБЗГУ, $F_н$, т		1,84	6,37	12,2	17,8
Продольная сила волнового давления, сдвигающая ПБЗГУ, $F_п$, т		1,37	4,74	9,07	13,2

Таблица 3.5

Результаты расчета ПБЗГУ различной модели

Высота волны, h, м			1	2	3	4
Протяженность покрытия, расположенного ниже зоны активного воздействия волны, $l_н$, м		m=2	3,15	7,22	10,9	14,5
		m=3	5,11	10,2	15,3	20,4
		m=4	6,45	13,0	19,4	26,0
		m=8	11,6	23,2	34,8	46,4
Сила, удерживающая ПБЗГУ в зоне активного воздействия волны, $F_у$, т	m=2	Модель №1	1,06	3,66	7,75	14,3
		Модель №2	0,875	3,3	7,19	13,5
		Модель №4	0,964	3,48	7,47	13,9
	m=3	Модель №1	1,16	4,01	8,34	14,0
		Модель №2	0,973	3,63	7,76	13,2
		Модель №4	1,07	3,82	8,04	13,6
	m=4	Модель №1	1,24	4,16	8,48	13,9
		Модель №2	1,04	3,76	7,88	13,1
		Модель №4	1,14	3,96	8,17	13,5
	m=8	Модель №1	1,27	3,89	7,16	10,3
		Модель №2	1,03	3,41	6,43	9,35
		Модель №4	1,15	3,65	6,79	9,82
Реактивная сила от бетонных блоков, расположенных ниже зоны активного воздействия волны, N_c , т	m=2	Модель №1	0,556	1,28	1,93	2,56
		Модель №2	0,175	0,402	0,607	0,808
		Модель №4	0,362	0,829	1,25	1,66
	m=3	Модель №1	0,8	1,59	2,39	3,19
		Модель №2	0,253	0,504	0,756	1,01
		Модель №4	0,52	1,04	1,56	2,08
	m=4	Модель №1	0,933	1,88	2,8	3,76
		Модель №2	0,294	0,594	0,886	1,19
		Модель №4	0,606	1,22	1,82	2,44
	m=8	Модель №1	1,45	2,89	4,34	5,79
		Модель №2	0,456	0,913	1,37	1,82
		Модель №4	0,94	1,88	2,82	3,76

Таблица 3.6

Расчетные значения коэффициента запаса устойчивости ПБЗГУ различной модели

Коэффициент заложения откоса	Номер модели ПБЗГУ	Высота волны, h, м			
		1	2	3	4
m=2 ($\alpha = 26{,}5^0$)	Модель №1	4,97	3,86	3,39	3,11
	Модель №2	3,23	2,89	2,74	2,64
	Модель №4	4,08	3,37	3,06	2,87
m=3 ($\alpha = 18{,}4^0$)	Модель №1	2,7	1,97	1,74	1,62
	Модель №2	1,69	1,46	1,38	1,34
	Модель №4	2,19	1,71	1,56	1,48
m=4 ($\alpha = 14^0$)	Модель №1	2,22	1,63	1,44	1,34
	Модель №2	1,36	1,18	1,12	1,08
	Модель №4	1,78	1,4	1,27	1,21
m=8 ($\alpha = 7{,}12^0$)	Модель №1	1,98	1,43	1,28	1,22
	Модель №2	1,08	0,91	0,86	0,84
	Модель №4	1,52	1,17	1,06	1,03

3.4. Выводы и предложения

1. Результаты проведенного расчетного анализа показали, что с ростом коэффициента заложения откоса m площадь активного воздействия волны на откос увеличивается, а среднее давление на откос уменьшается, так что нормальная составляющая силы волнового давления $F_н$ мало изменяется при изменении крутизны откоса. Продольная сила волнового давления $F_п$, сдвигающая покрытие ПБЗГУ, существенно зависит от крутизны откоса, увеличиваясь с увеличением коэффициента заложения откоса m.

2. 3. При выполнении покрытия откоса из ПБЗГУ, модели №1 и №4 обладают достаточным запасом устойчивости во всем расчетном диапазоне изменения коэффициента откоса $2 \leq m \leq 8$ и высоты волны $1 \leq h \leq 4$.

4. ПБЗГУ модели № 2 могут использоваться для защиты от волнового воздействия только на крутых откосах $m < 4$ или при небольшой высоте волны $h < 1$м.

.

Заключение

Анализ результатов проведенных расчетно-теоретических исследований позволяет сделать следующее заключение.

1. Покрытие бетонное защитное гибкое универсальное (ПБЗГУ), изготовленное по ТУ 5859-002-59565714-2012, может использоваться в качестве защитного покрытия откосов берегов и различных гидротехнических сооружений, подверженных воздействию ледовой и волновой нагрузок.

2. Различные модели ПБЗГУ обладают различной сопротивляемостью воздействию ледяного покрова при его термическом расширении или повышении уровня воды, а также волновой нагрузки. Наибольшей сопротивляемостью обладают ПБЗГУ модели №1, уложенные на откосе с соединением отдельных плит между собой, а наименьшей - ПБЗГУ модели №2.

3. На откосах, подверженных статической нагрузке от термически расширяющего ледяного покрова, для обеспечения достаточного запаса прочности и устойчивости могут использоваться покрытия из ПБЗГУ моделей №1 и №4. ПБЗГУ модели №2 во всем расчетном диапазоне изменения коэффициента откоса и толщины ледяного покрова не имеют достаточного запаса по устойчивости покрытия от воздействия ледяного покрова при его термическом расширении, а поэтому могут быть использованы только как облегченное покрытие вне зоны действия ледяного покрова

4. На откосах, подверженных нагрузке от ледяного покрова при повышении уровня воды в водоеме, достаточным запасом прочности и устойчивости обладают ПБЗГУ моделей №1 и №4, уложенные на откосах с коэффициентом заложения $m>4$ и при заглублении покрытия под воду на глубину $h>4$м.

5. На откосах, подверженных волновым воздействиям, достаточным запасом устойчивости обладают ПБЗГУ моделей №1 и №4, уложенные на откос, во всем расчетном диапазоне изменения коэффициента заложения откоса $2< m<8$ и высоты волны. ПБЗГУ модели №2 могут использоваться для защиты от волнового воздействия только на крутых откосах ($m<4$) или при небольшой высоте волны ($h<1$м).

6. Целесообразность использования той или иной модели ПБЗГУ для защиты откосов окончательно должна устанавливаться на основе сравнительного технико-экономического обоснования.

Список использованной литературы

1. Канарский В.Ф. Крепление волновых откосов гидротехнических сооружений. – Киев «Будивельник», 1971.- 76с.

2. Коржавин К.Н. Воздействие льда на инженерные сооружения.- Новосибирск: СО АН СССР, 1962.- 204с.

3. Панфилов Д.Ф. Воздействие льда на сооружения при изменении уровня воды// Изв. Вузов. Строительство и архитектура.-1967.-№2.-с. 139-145.

4. Проектирование креплений земляных откосов на водохранилищах.- М.:Стройиздат, 1962.-216с.

5. СН 92-60. Технические условия определения волновых воздействий на морские и речные сооружения и берега.-М.: Стройиздат, 1960.-132 с.

6. СН 288-64. Указания по проектированию гидротехнических сооружений, подверженных волновым воздействиям.-М.:Стройиздат, 1965.-130 с.

7. СНиП 2.06.04.-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).-М.: Стройиздат, 1983.-39с

8. СП 32-103-97. Проектирование морских берегозащитных сооружений.-М.: Трансстрой, 1998.- 46с.

9. Справочник по гидравлическим расчетам// под ред. П.Г. Киселева,-М.: Энергия, 1972.- 312 с.

10. ТУ 5859-002-59565714-2012. Покрытие бетонное защитное гибкое универсальное (ПБЗГУ).- Воронеж: ООО «Спецпром 1», 2012.-39 с.

11. Шайтан В.С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений.- М.: Стройиздат, 1974.- 351 с.