

Федеральное агентство по образованию РФ  
ГОУВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
Центр научных исследований и судебных экспертиз в строительстве  
(ЦНИСЭС)

Лицензия  
Рег.№ ГС-1-36-02-21-0-  
3664007626 – 000465-2  
от 12 сентября 2002 года



Утверждаю  
Ректор ВГАСУ

И.С.Суровцев

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ГИБКИХ  
ЗАЩИТНЫХ БЕТОННЫХ МАТОВ (УГЗБМ)**

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ**

Договор № 09.07-51 от 12 октября 2007 года

Директор ЦНИСЭС  
Руководитель экспертной группы

 Ю.В.Мясищев

<b>Содержание</b>		<b>Стр.</b>
	Введение.....	2 3
1.	Сопротивляемость УГЗБМ процессу скручивания и дрейфа.....	6
2.	Нагрузки и воздействие потока воды на трубопровод подводного перехода, защищенного УГЗБМ.....	15
3.	Воздействие ледяного покрова на защищенный УГЗБМ трубопровод подводного перехода.....	21
4.	Нагрузки и воздействие потока воды на береговой откос, защищенный УГЗБМ.....	23
5.	Воздействие ледяного покрова на защищенный УГЗБМ береговой откос.....	27
6.	Ударное воздействие внешних предметов на сооружения, защищенные УГЗБМ.....	29
7.	Самопроизвольное смещение УГЗБМ по склону.....	33
	Заключение .....	36
	Рекомендации .....	37
	Список использованной литературы.....	38
	Приложение.....	39

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и строительстве различных сооружений, подверженных статическому и динамическому воздействию водного потока, должны быть предусмотрены и выполнены специальные мероприятия, которые обеспечили бы надежную и безаварийную эксплуатацию сооружения в течение длительного времени. Так, например, пересечение водных преград магистральными трубопроводами наиболее часто осуществляют путем строительства подводных переходов. Такие переходы, несмотря на их, сравнительно небольшой удельный объем в общем объеме строительства магистральных трубопроводов, являются наиболее ответственными сооружениями. Это обусловлено сложностью строительства и ремонта подводных трубопроводов, что предъявляет повышенные требования к качеству выполняемых работ при сооружении подводных переходов. При этом необходимо исключить возможность воздействия на трубопроводы льда, плавающего леса, топняка и других предметов, переносимых потоком воды, предохранить изоляцию трубопровода от повреждений, обеспечить балластировку или утяжеление трубопроводов, обладающих положительной плавучестью, а также исключить деформацию русла под трубопроводами.

Подводные трубопроводы подвергаются воздействию речного потока как в строительный период при укладке трубопровода, так и во время эксплуатации, особенно при укладке трубопровода на дно без заглубления в грунт или частичном оголении трубопровода в результате размыва дна в створе перехода. Устойчивость подводного трубопровода зависит от силового воздействия потока и величины отрицательной плавучести. Необходимая отрицательная плавучесть обеспечивается при этом, как правило, искусственно создаваемой пригрузкой в виде балласта. Утяжеление трубопроводов выполняют чугунными или железобетонными отдельными грузами и в виде сплошных покрытий трубы бетоном или асфальтобетоном. Это усложняет производство работ, увеличивает стоимость и создает дополнительные трудности при строительстве подводного перехода.

Сложные условия работы возникают также для различных сооружений, подверженных воздействию ледяного покрова, как в зимний, так и, особенно, в весенний периоды. Наиболее опасно в период весеннего ледохода воздействие льда на конструктивные элементы сооружения.

Для защиты оголенных или недостаточно заглубленных подводных трубопроводов и их противокоррозионной изоляции от механических повреждений, предотвращения размыва течением реки участков дна, берегоукреплений, защиты склонов дорог и мостовых переходов, а также для пригрузки подводных трубопроводов, обладающих положительной плавучестью, ЗАО Предприятие подводно-технических работ «Петр» разработало универсальное защитное бетонное покрытие (УГЗБМ), защищенное патентом РФ № 2129635.

Покрытие изготовлено в виде гибкого бетонного мата, состоящего из набора 36 бетонных блоков, соединенных между собой замоноличенным ис-

кусственным канатом [ 1 ]. Габаритная длина УГЗБМ составляет- 2746 мм., габаритная ширина – 1226 мм.

В настоящее время в серийном производстве находятся четыре модели УГЗБМ, отличающиеся типами применяемых бетонных блоков. Конструкция УГЗБМ модели № 1, показанная на рис. 1 Приложения, выполнена из бетонных блоков типа 1 и имеет максимальную высоту 240 мм, вес 1253 кг; УГЗБМ модели № 2 (рис. 2 Приложения) выполнен из бетонных блоков типа 2, имеет максимальную высоту 60 мм, вес 399 кг; УГЗБМ модели № 4 (рис. 3 Приложения) выполнен из бетонных блоков типа 3, имеет максимальную высоту 150 мм и вес 826 кг; УГЗБМ модели № 6 (рис. 4 Приложения) выполнен из бетонных блоков типа 4, имеет максимальную высоту 240 мм и вес 954 кг.

Бетонные блоки УГЗБМ по форме представляют собой две усеченные пирамиды с общим квадратным основанием. Основные габаритные размеры бетонных блоков приведены в таблице В<sub>1</sub>.

**Таблица В<sub>1</sub>**

Габаритные размеры бетонных блоков

Типы бетонных блоков	Общее основание, мм	Вершина 1, мм	Высота 1, мм	Вершина 2, мм	Высота 2, мм
Бетонный блок типа 1	300 x 300	190 x 190	120	190 x 190	120
Бетонный блок типа 2	300 x 300	260 x 260	30	260 x 260	30
Бетонный блок типа 3	300 x 300	260 x 260	30	190 x 190	120
Бетонный блок типа 4	300 x 300	70 x 70	170	210 x 210	70

Как показано в работе [2] УГЗБМ надежно предохраняет защищаемое сооружение от размыва грунта, динамического воздействия льда и многочисленных ударов различных предметов, переносимых потоком воды. Защита из УГЗБМ значительно снижает горизонтальную силу лобового сопротивления трубопровода подводного перехода и полностью исключает вертикальную подъемную силу. Это исключает возможность вибраций подводного трубопровода, которые могут привести к его разрыву.

Применение УГЗБМ, в отличие от сплошного бетонного покрытия трубопровода, не приводит к увеличению его жесткости и, следовательно, увеличению минимального радиуса кривизны при его укладке, при этом также устраняется значительная трудоемкость нанесения сплошного балластного

покрытия. Применение УГЗБМ избавляет также от необходимости выполнять футеровку трубопровода подводного перехода и позволяет протаскивать его по любым типам спусковых дорожек, а также любым грунтам с полной гарантией сохранения изоляции. Все это дает возможность снизить стоимость строительства и эксплуатации подводного перехода, повысить надежность работы и значительно увеличить срок эксплуатации подводного трубопровода, который при качественном выполнении проекта и контроле за строительством будет равен или превышать расчетный срок эксплуатации всего магистрального трубопровода.

Однако, защищая сооружение от статического и динамического действия потока воды, а также воздействия ледяного покрова в зимний и весенний периоды, УГЗБМ воспринимает эти воздействия на себя. Поэтому надежностью работы защиты, выполненной из УГЗБМ, будет определяться надежность работы всего защищаемого сооружения.

В настоящем отчете приводятся результаты расчетно-теоретического исследования гидродинамического воздействия потока на различные сооружения, защищенные УГЗБМ.

## **1. СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ УГЗБМ ПРОЦЕССУ СКРУЧИВАНИЯ И ДРЕЙФА**

### **1.1. Формулировка задачи**

Рассчитать скорость течения реки, которая в состоянии оторвать от дна периферийные бетонные блоки УГЗБМ различных моделей, уложенных на:

- рыхлый грунт (песчано-иловая смесь);
- твердый грунт (песчано-глинистая смесь);
- неровный грунт (камень);
- гравийно-галечный грунт (окатыш).

### **1.2. Математическое обоснование задачи**

Проведенные ранее расчетно-теоретические исследования гидродинамического воздействия потока на подводные трубопроводные переходы, защищенные УГЗБМ, показали, что процесс скручивания полотна УГЗБМ, лежащего на дне водотока, под действием потока воды начинается путем отрыва от дна и дальнейшего поворота первого периферийного ряда бетонных блоков [2].

Будем считать, что полотно УГЗБМ уложено на плоское горизонтальное дно водотока, как показано на рис. 5. Это дает возможность рассмотреть плоскую задачу, т.е. рассчитать эффект отрыва защитного мата единичной ширины ( $b = 1$  м), или эффект отрыва только одного периферийного бетонного блока.

На периферийный блок УГЗБМ, находящийся в воде, будут действовать следующие силы:

1) Сила тяжести блока  $G$ , приложенная в его центре тяжести и направленная вертикально вниз (рис. 5):

$$G = G_m/n, \quad (1.1)$$

где  $G_m$  – вес одного мата УГЗБМ;

$n$  – число бетонных блоков в одном мате ( $n = 36$ ).

2) Архимедова подъемная сила  $P_a$ , направленная вертикально вверх и приложенная в центре тяжести блока:

$$P_a = \gamma_v \times V_b, \quad (1.2)$$

где  $\gamma_v$  – объемный вес воды ( $\gamma_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ );

$V_b$  – объем одного блока УГЗБМ, равный  $V_b = V/n$ .

Здесь  $V$  – объем бетона в одном полотне УГЗБМ.

3) Горизонтальная сила лобового сопротивления  $F_d$ , обусловленная гидродинамическим давлением потока воды на бетонный блок:

$$F_d = C_d \times S \times \rho \times U^2/2, \quad (1.3)$$

где  $C_d$  - коэффициент лобового сопротивления, зависящий от скорости потока, формы обтекаемого тела и состояния его поверхности (примем согласно [3] для скошенного переднего торца бетонного блока  $C_d = 1,5$ );

$S$  - площадь миделевого сечения, т.е. площадь сечения тела плоскостью, перпендикулярной направлению движения потока;

$\rho$  - плотность воды;

$U$  - скорость, с которой жидкость воздействует на погруженное в нее тело.

4) Сила гидростатического давления воды на бетонный блок  $P$ , направленная вертикально вниз (рис. 5):

$$P = \gamma_B \times H \times S_c, \quad (1.4)$$

где  $H$  – глубина воды в водотоке;

$S_c$  - площадь соприкосновения бетонного блока с подстилающим грунтом.

Необходимо отметить, что эта сила возникает только при плотном прилегании бетонного блока к поверхности дна реки, когда наблюдается так называемый эффект «присасывания» тела к подстилающей поверхности. Очевидно, это соответствует наличию на дне реки песчано-иловой или песчано-глинистой смеси. Если УГЗБМ уложены на неровный каменистый или гравийно-галечный грунт, то гидростатическое давление воды распространяется и на нижнюю грань бетонного блока, соприкасающуюся с дном водотока, что обуславливает возникновение вертикальной силы, уравнивающей силу  $P$  и в этом случае эффект «присасывания» пропадает.

5) Сила трения бетонного блока о подстилающий грунт  $F_{гр}$ , равная произведению коэффициента трения на силу нормального давления и направленная горизонтально навстречу скорости движения воды. Для рассматриваемого случая

$$F_{гр} = f \times (G + P - P_a), \quad (1.5)$$

где  $f$  - коэффициент трения бетонного блока о подстилающий грунт, значение которого для различных грунтов следующее [4]:

мокрые глины  $f = 0,2$ ; мокрые суглинки и супеси  $f = 0,3$ ; мокрый пе-

сок средней крупности  $f = 0,35$ ; мокрый гравий и галька  $f = 0,5$ ; грунт в скальном основании  $f = 0,6 \div 0,75$ .

б) При заглублении вершин бетонных блоков в грунт, необходимо учитывать силу пассивного отпора грунта  $F_{гр}$ , определяемую по формуле [6]:

$$F_{гр} = \frac{1}{2} \gamma \cdot L \cdot t^2 \cdot tq^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2C \cdot L \cdot t \cdot tq \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1.6)$$

где  $\gamma$  - объемный вес грунта;

$L$  - средняя длина погруженного в грунт части бетонного блока;

$t$  - глубина погружения в грунт бетонного блока;

$\varphi$  - угол внутреннего трения грунта;

$C$  - коэффициент сцепления грунта.

Очевидно, что отрыв бетонного блока от дна водотока, скручивание и дрейф полотна УГЗБМ в потоке воды может произойти, если горизонтальная сила лобового сопротивления  $F_d$  будет превосходить суммарную силу трения  $F_{тр}$  и силу пассивного отпора грунта

$$F_d \geq F_{тр} + F_{гр} \quad (1.7)$$

Подставляя найденные значения сил из этого соотношения можно найти предельную скорость потока, способную оторвать от дна периферийные бетонные блоки УГЗБМ:

$$U \geq \sqrt{\frac{2}{C_d \cdot S \cdot \rho}} \left[ f(G + P - P_a) + F_{гр} \right]. \quad (1.8)$$

Найденная скорость является придонной скоростью, т.е. скоростью у дна реки. В соответствии с рекомендациями [5] скорость у дна реки составляет порядка 70 % средней скорости течения  $U_{ср}$ , представляющей собой частное от деления общего расхода воды на площадь живого сечения реки. Тогда очевидно, что предельная средняя скорость течения при которой возможен отрыв УГЗБМ от дна, составляет :  $U_{ср} = U / 0,7 = 1,43 U$ .

### **1.3. Результаты вычислений**

Результаты вычислений по приведенным формулам сил действующих на различные бетонные блоки представлены в табл. 1.1, 1.2 и 1.3.

В табл. 1.1 площади миделевого сечения блоков соответствуют укладке УГЗБМ на твердый грунт без заглубления бетонных блоков, а площади соприкосновения  $S_c$  соответствуют положению УГЗБМ модели 4 и 6, обращенных к грунту вершинами пирамид бетонных блоков меньшей площади. Такому же положению бетонных матов относительно подстилающего грунта



соответствуют значения силы гидростатического давления для моделей 4 и 6 в табл. 1.2. Как видно из таблицы сила гидростатического давления  $P$ , прижимающая УГЗБМ к подстилающему грунту существенно зависит от глубины воды  $H$ , увеличиваясь с ее увеличением.

**Таблица 1.1**

Значения сил, объемов и площадей различных бетонных блоков

Номер модели УГЗБМ	1	2	4	6
Тип бетонного блока	1	2	3	4
Объем бетонного блока $V_b, \text{ м}^3$	0,0146	0,00472	0,0095	0,0112
Сила тяжести $G, \text{ кг}$	34,8	11,08	22,94	26,5
Архимедова сила $P_a, \text{ кг}$	14,6	4,72	9,5	11,2
Площадь миделевого сечения $S, \text{ м}^2$	0,0588	0,0168	0,0378	0,0562
Площадь соприкосновения с грунтом $S_c, \text{ м}^2$	0,0361	0,0676	0,0361	0,0049

**Таблица 1.2**

Значение силы гидростатического давления  $P, \text{ кг}$ , прижимающей бетонный блок к грунту

H, м \diagdown № УГЗБМ	1	2	4	6
	1	36,1	67,6	36,1
2	72,2	135,2	72,2	9,8
3	108,3	202,8	108,3	14,7
4	144,4	270,4	144,4	19,6
5	180,5	338	180,5	24,5

Значения силы пассивного отпора грунта  $F_{гр}$ , приведенные в табл. 1.3, определены по формуле (1.6), в предположении, что бетонные блоки заглублены в грунт на всю высоту пирамиды до ее основания. Используемые при расчете значения  $L$  и  $t$  для разных моделей приведены в табл.1.4

**Таблица 1.3**

Значение силы пассивного отпора грунта  $F_{гр}$ , кГ при полном заглублении высоты пирамиды блока

№ УГЗБМ	1	2	4	6
Вид грунта				
Рыхлый песчано-иловый	30,3	6,33	30,3	37,1
Твердый песчано-глинистый	103,6	27,9	103,6	114,1
Гравийно-галечный	22,7	1,62	22,7	34,3

**Таблица 1.4**

Значения  $L$  и  $t$ , соответствующие заглублению блоков на всю высоту пирамиды

Модель УГЗБМ	1	2	3	4
$L$ , мм	245	280	245	185
$t$ , мм	120	30	120	170

Численные значения параметров, использованных в расчете, согласно [6,7], приведены в табл. 1.5

**Таблица 1.5**

Значения параметров, характеризующих физические свойства грунта

Параметр	Вид грунта		Песчано-иловый	Песчано-глинистый	Гравийно-галечный
	Обозначение	Размерность			
Объемный вес	$\gamma$	$\text{т}/\text{м}^3$	2,2	2,6	2,8
Угол внутреннего трения	$\varphi$	град	28	15	40
Коэффициент сцепления	$C$	$\text{кг}/\text{см}^2$	0,04	0,04 ÷ 0,25	0

Если полотна УГЗБМ уложены на грунт без заглубления в него бетонных блоков, при этом также не происходит самопроизвольного их заглубления, то при расчете сила пассивного сопротивления грунта не должна учитываться, и предельная скорость течения реки определяется по формуле:

$$U_{cp} = 1,43 \sqrt{\frac{2q \cdot f}{C_d \cdot S \gamma_s}} [G + P - P_a] \quad (1.9)$$

В табл. 1.6, 1.7 и 1.8 представлены результаты вычисления предельной скорости течения реки по этой формуле для различных моделей УГЗБМ при различной глубине реки и свойств грунта.

**Таблица 1.6**

Значения предельной скорости течения реки  $U_{cp}$ , м/с, для УГЗБМ, уложенных на рыхлый песчано-иловый грунт ( $f = 0,35$ ) без заглубления бетонных блоков

№ УГЗБМ \ Н, м	1	2	4	6
1	2,99	6,44	3,51	1,84
2	3,84	8,90	4,6	2,04
3	4,52	10,8	5,49	2,24
4	5,12	12,42	6,24	2,41
5	5,65	13,86	6,93	2,58

**Таблица 1.7**

Значения предельной скорости течения реки  $U_{cp}$ , м/с, для УГЗБМ, уложенных на твердый песчано-глинистый грунт ( $f = 0,2$ ) без заглубления бетонных блоков

№ УГЗБМ \ Н, м	1	2	4	6
1	2,26	4,87	2,65	1,39
2	2,9	6,73	3,48	1,54
3	3,42	8,17	4,15	1,69
4	3,87	9,39	4,72	1,82
5	4,27	10,48	5,24	1,95

Таблица 1.8

Значения предельной скорости течения реки  $U_{cp}$ ,  $\frac{м}{с}$ , при укладке УГЗБМ на неровный каменистый и гравийно-галечный грунт без заглабления бетонных блоков

№ УГЗБМ \ Вид грунта	1	2	4	6
Неровный каменистый ( $f = 0,75$ )	2,63	2,76	2,64	2,34
Гравийно-галечный ( $f = 0,5$ )	2,15	2,26	2,18	1,91

Так как при расчете предельных скоростей, приведенных в табл. 1.8, не учитывалась сила, гидростатического давления, прижимающая бетонный блок к грунту ( $P = 0$ ), то для этого случая предельные скорости не зависят от глубины реки и ориентации УГЗБМ относительно подстилающего грунта.

Как видно из приведенных таблиц все модели УГЗБМ, кроме модели номер 6, обладают достаточной сопротивляемостью процессу скручивания и дрейфа. Полотно модели номер 6, уложенное на грунт гранями бетонных блоков меньшей площади без заглабления, имеет сравнительно небольшую предельную скорость, составляющую всего  $1,5 - 2 \frac{м}{с}$ . Вместе с тем, имея небольшую площадь контакта с грунтом ( $S_c = 0,0049 \text{ м}^2$  табл.1.1) бетонные блоки этой модели будут самопогружаться в рыхлый песчано-иловый грунт.

Действительно, например при глубине реки  $H = 2\text{м}$ , сила давления блока УГЗБМ этой модели на грунт составит:

$$F_{\text{давл}} = G - P_a + P = 26,5 - 11,2 + 9,8 = 25,1 \text{ кг},$$

а удельное давление на грунт:

$$q = \frac{F_{\text{давл}}}{S_c} = \frac{25,1 \cdot 10^4}{0,0049} = 0,51 \text{ кг/см}^2,$$

что больше допустимого удельного давления на рыхлый песчано-иловый грунт.

В связи с этим проведем расчет предельной скорости течения реки с учетом силы пассивного отпора грунта, в предположении, что бетонные блоки заглавлены в грунт на всю высоту пирамиды до ее основания. Результаты расчета для УГЗБМ различных моделей, уложенных на песчано-иловый грунт, проведенного с использованием формулы (1.8) представлены в табл.1.9.

Таблица 1.9

Результаты расчета предельной скорости течения реки для УГЗБМ различных моделей, уложенных на рыхлый песчано-иловый грунт с заглублением бетонных блоков

№ УГЗБМ	1	2	4	6
Параметр				
Площадь миделевого сечения $S$ , м <sup>2</sup>	0,0294	0,0084	0,0084	0,0178
Сила тяжести блока $G$ , кг	34,8	11,08	22,94	26,5
Архимедова сила $P_a$ , кг	14,6	4,72	9,5	11,2
Сила отпора грунта $F_{гр}$ , кг	30,3	6,33	30,3	37,6
Предельная скорость течения реки $U_{ср}$ , м/с	5,83	5,2	10,5	7,99

Расчеты проведены в предположении отсутствия силы гидростатического давления на блок, т.е. при  $H = 0$ . При учете глубины потока, предельная скорость еще более увеличивается.

Из сравнения таблиц 1.6 и 1.9 видно, что заглубление бетонных блоков в грунт приводит к увеличению значений предельных скоростей, которые при этом значительно превышают скорости реально существующих рек.

#### 1.4. Выводы и предложения

1. Результаты вычислений показывают, что УГЗБМ всех моделей, уложенные на песчано-иловое или песчано-глинистое дно водотока, обладают достаточной сопротивляемостью процессу скручивания и дрейфа. При этом предельная скорость течения реки, при превышении которой возможен отрыв блоков УГЗБМ от дна, при глубине более 2 м для всех моделей составляет более 3 м/с, что позволяет укладывать УГЗБМ на песчано-иловое или песчано-глинистое дно без дополнительного крепления практически при всех реально существующих скоростях равнинных рек.

2. Наименьшая предельная скорость течения реки соответствует УГЗБМ модели номер 6, уложенным на твердый песчано-глинистый грунт гранями бетонных блоков меньшей площади без заглубления, и составляет всего 1,5–2 м/с. Поэтому УГЗБМ этой модели не рекомендуется укладывать на твердое песчано-глинистое дно реки без заглубления бетонных блоков.

3. При укладке УГЗБМ на неровный каменистый или галечный грунт предельная скорость не зависит от глубины воды в реке и ее значения составляют порядка  $2 - 3 \text{ м/с}$ . Поэтому в этом случае для предотвращения отрыва УГЗБМ при больших скоростях течения реки может потребоваться дополнительное крепление бетонных блоков к грунту, например анкерное.

## **2. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКА ВОДЫ НА ТРУБОПРОВОД ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА, ЗАЩИЩЕННОГО УГЗБМ**

### **2.1. Формулировка задач**

Трубопровод подводного перехода проложен непосредственно по дну водоема. Защита трубопровода подводного перехода выполнена с использованием УГЗБМ. Найти минимальную ширину и угол наклона полотна УГЗБМ различных моделей, уложенных на:

- рыхлый грунт (песчано-иловая смесь);
- твердый связный грунт (песчано-глинистая смесь);
- неровный каменистый грунт,

способных противостоять течениям реки со скоростью до  $4,5 \text{ м/с}$ .

Сопротивлением потоку воды непосредственно трубопровода подводного перехода пренебречь. Трубопроводы стальные стандартные, диаметром условного прохода от 0,15 до 1,5 м.

### **2.2. Математическое обоснование задачи**

Для решения поставленной задачи рассмотрим схему защиты подводного трубопровода согласно рис.6. На полотно УГЗБМ, уложенного на грунт с углом наклона  $\alpha$  к горизонту, действуют следующие силы:

- 1) Вес полотна УГЗБМ  $G$ , уменьшенный на вес вытесненной ее воды. Эту силу можно разложить на две составляющих: силу нормального давления  $N = G \cos \alpha$  и сдвигающую силу  $H = G \sin \alpha$ .
- 2) Сила гидродинамического давления воды  $F_d$ , направленная горизонтально и определяемая по формуле (1.3). Эту силу также можно разложить на две составляющие силы: силу  $F_N = F_d \sin \alpha$ , прижимающую полотно УГЗБМ к грунту, и силу  $F_e = F_d \cos \alpha$ , сдвигающую полотно вдоль грунта.

При укладке матов без погружения бетонных блоков в грунт предельное состояние, при котором начинается сдвиг полотна УГЗБМ под действием потока воды, определяется выражением:

$$F_e \geq H + f(N + F_N), \quad (2.1)$$

где  $f$  - коэффициент трения скольжения бетонного блока о грунт.

Для связных грунтов при наличии сцепления между полотном и грунтом необходимо учитывать силу сцепления УГЗБМ с грунтом:  $F_c = CS_c$ . Здесь  $C$  – коэффициент сцепления бетонного полотна с грунтом;  $S_c$  – площадь контакта бетонных блоков с грунтом. При этом предельное состояние определяется выражением:

$$F_e \geq H + f(N + F_N) + F_c. \quad (2.2)$$

При наличии погружения бетонных блоков в грунт на определенную глубину  $t$  необходимо учитывать силу пассивного отпора грунта  $F_{гр}$ , согласно формуле (1.6), а предельное состояние определяется выражением:

$$F_e \geq H + f(N + F_N) + F_{гр}, \quad (2.3)$$

Рассмотрим полотно УГЗБМ единичной длины ( $L=1$  м), защищающее трубопровод диаметром  $D$  со стороны набегающего потока воды.

При ширине полотна, равной  $b$ , его вес, уменьшенный на вес вытесненной воды, равен:

$$G = G_m \frac{b \cdot 1}{S_m} \cdot \frac{\gamma_b - \gamma_e}{\gamma_b} = 0,18G_m \cdot b$$

где  $\gamma_b = 2,5 \text{ т/м}^3$  – объемный вес бетона;

$\gamma_e = 1 \text{ т/м}^3$  – объемный вес воды;

$G_m$  – вес мата УГЗБМ данной модели, кг;

$S_m = 3,37 \text{ м}^2$  – габаритная площадь УГЗБМ.

Сила гидродинамического давления воды при этом равна:

$$F_d = C_d \cdot D \cdot \frac{\gamma_e \cdot U^2}{2g} = 61DU^2,$$

где коэффициент сопротивления давления  $C_d$  согласно рекомендациям [3] принят равным 1, 2.

С учетом этих соотношений формулы (2.1), (2.2) и (2.3) дают следующую связь между скоростью течения  $U$ , шириной полотна УГЗБМ, диаметром трубопровода  $D$  и углом наклона  $\alpha$  при предельном состоянии:

для твердого каменистого грунта, при укладке УГЗБМ без погружения бетонных блоков в грунт

$$b = 340K \frac{DU^2}{G_m}; \quad (2.4)$$

для твердого связного грунта (песчано-глинистая смесь), при укладке УГЗБМ без погружения бетонных блоков в грунт :

$$b = 340 \frac{K}{A_1} \cdot \frac{DU^2}{G_m}; \quad (2.5)$$

для рыхлого грунта (песчано-иловая смесь), при заглублении бетонных блоков в грунт:



$$b = 340 \frac{K}{A_2} \cdot \frac{DU^2}{G_m} . \quad (2.6)$$

В этих формулах коэффициенты  $K$ ,  $A_1$  и  $A_2$  равны:

$$K = \frac{\cos \alpha - f \sin \alpha}{\sin \alpha + f \cos \alpha} ; \quad (2.7)$$

$$A_1 = 1 + 60 \frac{F_{cl}}{G_m (\sin \alpha + f \cos \alpha)} ; \quad (2.8)$$

$$A_2 = 1 + 60 \frac{F_{гр.1}}{G_m (\sin \alpha + f \cos \alpha)} \quad (2.9)$$

где  $F_{cl} = C \times S_6$  - сила сцепления одного блока УГЗБМ с грунтом;

$S_6$  - площадь контакта бетонного блока с грунтом, см<sup>2</sup>;

$C$  - коэффициент сцепления бетонного блока с грунтом, кг/см<sup>2</sup>;

$F_{гр.1}$  - сила пассивного отпора грунта для одного бетонного блока, определяемая по табл. 1.3.

### 2.3. Результаты вычислений

Как видно из полученных расчетных формул влияние угла  $\alpha$  наклона полотна УГЗБМ к горизонту на определяемые параметры проявляется, в основном, только через коэффициент  $K$ . Значения этого коэффициента, вычисленные для различных углов  $\alpha$  и коэффициента трения  $f$ , приведены в табл.2.1.

**Таблица 2.1**

Значения  $K$ , вычисленные по формуле (2.7)

$\alpha \backslash f$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0,2	5	3,42	2,56	2,02	1,64	1,36	1,13	0,95	0,8
0,35	2,86	2,22	1,78	1,47	1,22	1,02	0,86	0,72	0,59
0,5	2	1,63	1,34	1,13	0,95	0,79	0,66	0,54	0,43
0,75	1,33	1,11	0,94	0,78	0,65	0,53	0,43	0,33	0,23

Значения  $b$ , вычисленные по формуле (2.4) для различных моделей УГЗБМ, уложенных на твердый каменистый грунт ( $f = 0,75$ ) без погружения бетонных блоков, при максимальной скорости течения  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и условном диаметре трубопровода  $D = 1 \text{ м}$  приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Значения минимальной ширины полотна УГЗБМ, уложенных на твердый каменистый грунт, вычисленные по формуле (2.4) при  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и  $D = 1 \text{ м}$

$\alpha$	5	10	15	20	25	30	35	40
Модель 1	6,1	5,16	4,29	3,57	2,91	2,36	1,81	1,26
Модель 2	19,2	10,2	13,46	11,2	9,14	7,42	5,69	3,97
Модель 4	9,25	7,84	6,5	5,42	4,42	3,58	2,75	1,92
Модель 6	8,01	6,78	5,63	4,69	3,82	3,1	2,38	1,66
L	11,5	5,76	3,86	2,92	2,37	2	1,74	1,55

Как видно из формулы (2.4) значение  $b$  прямо пропорционально диаметру трубопровода  $D$  и квадрату скорости, поэтому минимальное значение ширины полотна при данных значениях диаметра легко находятся путем умножения значений, взятых из табл. 2.2, на величину диаметра трубопровода в метрах, а чтобы найти  $b$  при других значениях скорости необходимо значения табл. 2.2 умножить на величину  $(U/4,5)^2$ . Например, минимальная ширина полотна модели № 6 при  $\alpha = 5^\circ$  и скорости  $U = 3 \text{ м/с}$  составит:

$$b = 8,01 \times (3/4,5)^2 = 3,56 \text{ м.}$$

Из таблицы 2.2 видно, что из всех моделей УГЗБМ, уложенных на грунт без погружения в него бетонных блоков, наибольшей сопротивляемостью воздействию потока воды обладает модель № 1. причем минимальная ширина полотна для этой модели практически соизмерима с длиной откоса грунта  $L$ , соответствующей углу наклона полотна  $\alpha$  и диаметру трубопровода  $D$ :  $L = D/\sin\alpha$ . Значение этой величины также приводится в табл.2.2. Наименьшей сопротивляемостью потоку в данных условиях обладает полотно УГЗБМ модели № 2.

Значения  $b$ , вычисленные по формулам (2.5) и (2.8) для различных моделей УГЗБМ, уложенных на твердый песчано-глинистый грунт ( $f = 0,2$ ) без погружения бетонных блоков, при  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и  $D = 1 \text{ м}$ , приведены в табл.2.3. Коэффициент сцепления бетонного блока с грунтом принят  $C = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

Как видно из таблицы, в этом случае наибольшей сопротивляемостью воздействию потока воды обладает модель № 2, а наименьшей – модель № 6.

Это объясняется значительным увеличением силы сцепления полотна УГЗБМ модели № 4 по сравнению с моделью № 6, из-за большей площади контакта бетонного блока с грунтом.

Значения  $b$ , вычисленные по формулам (2.6) и (2.9) для различных моделей УГЗБМ, уложенных на рыхлый песчано-иловый грунт ( $f = 0,35$ ) при погружении бетонных блоков до основания пирамиды, при  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и  $D = 1 \text{ м}$ ,

**Таблица 2.3**

Значения минимальной ширины полотна УГЗБМ, уложенных на песчано-глинистый грунт, вычисленные по формуле (2.5) при  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и  $D = 1 \text{ м}$

$\alpha$	5	10	15	20	25	30	35	40
Модель 1	5,51	4,91	4,41	3,92	3,49	3,07	2,7	2,35
Модель 2	3,89	3,7	3,48	3,25	3,03	2,76	2,52	2,26
Модель 4	6,1	5,57	5,07	4,59	4,14	3,67	3,27	2,88
Модель 6	17,3	13,9	11,5	9,62	8,17	6,9	5,85	5,02

приведены в табл.2.4. при этом значения силы пассивного отпора грунта для одного бетонного блока взяты из табл. 1.3.

**Таблица 2.4**

Значения минимальной ширины полотна УГЗБМ, уложенных на рыхлый песчано-иловый грунт, вычисленные по формуле (2.6) при  $U = 4,5 \text{ м/с}$  и  $D = 1 \text{ м}$

$\alpha$	5	10	15	20	25	30	35	40
Модель 1	2,01	1,99	1,92	1,79	1,65	1,49	1,33	1,14
Модель 2	8,87	8,59	8,16	7,53	6,82	6,15	5,42	4,65
Модель 4	2,14	2,13	2,09	1,97	1,83	1,68	1,51	1,31
Модель 6	1,76	1,75	1,73	1,63	1,51	1,39	1,25	1,08

Из таблицы видно, что в этом случае наибольшей сопротивляемостью воздействию потока воды обладает модель № 6, а наименьшей – модель № 2, что объясняется значительной разницей глубины погружения бетонных блоков этих моделей в грунт. Модели УГЗБМ № 1 и 4 обладают практически одинаковой способностью сопротивляться воздействию водного потока при всех рассмотренных углах наклона полотна к горизонту.

Из сравнения табл. 2.2 и 2.4 также видно, что несмотря на уменьшение коэффициента трения УГЗБМ о грунт с ( $f = 0,75$ ) до ( $f = 0,35$ ) заглубление верших бетонных блоков в грунт приводит к значительному увеличению сопротивляемости уложенного полотна воздействию водного потока, при этом для всех моделей (кроме модели № 2) расчетная минимальная ширина полотна не превосходит длину откоса  $L$ , соответствующую углу наклона полотна и диаметру трубопровода.

#### **2.4. Выводы и предложения.**

1. Результаты вычислений показали, что в зависимости от физических свойств грунта различные модели УГЗБМ обладают различной сопротивляемостью воздействия водного потока. При защите трубопровода, уложенного на каменистый грунт, наибольшей сопротивляемостью обладает модель УГЗБМ № 1, на песчано-глинистый грунт – модель № 2, а рыхлый песчано-иловый грунт - модель № 6.

2. При защите трубопровода, уложенного на песчано-иловый грунт, угол наклона полотна УГЗБМ  $\alpha$  очевидно не должен превышать угол естественного откоса, определяемого углом внутреннего трения грунта  $\alpha$ . В этом случае можно рекомендовать ширину полотна УГЗБМ принимать равной длине откоса  $L$ , соответствующей углу внутреннего трения грунта  $\alpha$  и диаметру трубопровода  $D$ .

3. Проведенные расчеты показали, что защита УГЗБМ трубопровода подводного перехода обладает достаточной сопротивляемостью от воздействия водного потока для всех применяемых грунтов и всех реально существующих скоростей течения реки.

### **3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ЗАЩИЩЕННЫЙ УГЗБМ ТРУБОПРОВОД ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА**

#### **3.1. Формулировка задачи**

Трубопровод подводного перехода проложен непосредственно по дну водоема. Защита трубопровода подводного перехода выполнена с использованием УГЗБМ. Найти минимальную ширину и угол наклона полотна УГЗБМ различных моделей, уложенных на:

- рыхлый грунт (песчано-иловая смесь);
- твердый связный грунт (песчано-глинистая смесь);
- неровный каменистый грунт,

способных на течениях до  $4,5 \text{ м/с}$  выдержать давление ледяного затора, «переваливающегося» через гребень защиты из УГЗБМ.

#### **3.2. Математическое обоснование задачи**

Для решения поставленной задачи рассмотрим трубопровод подводного перехода, защищенный УГЗБМ.

При сильных ледоходах, а также в процессе образования заторов лед может образовать нагромождения на полотне защиты из УГЗБМ, как показано на схеме рис. 7 Приложения.

Очевидно, что возможность образования затора льда будет определяться углом  $\alpha$  наклона полотна УГЗБМ к горизонту. При  $\alpha = 0$  причин для образования затора льда нет, а при  $\alpha = 90^\circ$  возможность образования затора и нагромождения льда на защиту максимальная. Поэтому определим максимальный угол наклона полотна УГЗБМ к горизонту, при котором нагромождения льда еще способны «переваливаться» через гребень защиты без образования затора.

Ледяное поле,двигающееся под влиянием течения воды, обладает известным запасом кинетической энергии, поэтому при встрече с наклонной гранью полотна УГЗБМ оно будет воздействовать с некоторой силой  $F_r$ , направленной горизонтально. Эта сила может быть разложена на нормальную составляющую  $N$ , прижимающую бетонные блоки к грунту, и силу  $F_b$ , направленную вдоль фронта полотна защиты и стремящуюся поднять льдину по наклонной грани защиты. Подъему льдины будет препятствовать сила трения ее о бетонные блоки защиты  $F_{тр}$ , равная произведению коэффициента трения  $f_{л}$  на силу нормального давления:  $F_{тр} = f_{л} N$ . Очевидно, льдина будет вползать на полотно защиты и «переваливаться» через ее гребень, если  $F_b \geq F_{тр}$ . Учитывая, что  $F_b = F_r \cos \alpha$  и  $N = F_r \sin \alpha$ , это условие можно записать в виде:

$$\operatorname{Ctg} \alpha \geq f_{л}.$$

Согласно [9] коэффициент трения льда по бетону  $f_{л} = 0,07 - 0,14$ , при этом  $\alpha = 86-82^\circ$ .

Таким образом, для предотвращения затора льда у трубопровода подводного перехода, защищенного УГЗБМ, угол наклона полотна защиты к горизонту необходимо выполнять с некоторым запасом  $\alpha \leq 80^{\circ}$ .

Сила трения льдины о бетонные блоки будет стремиться сдвинуть полотно защиты вдоль наклонной грани. Этому сдвигу препятствует сила трения блоков о грунт и сила пассивного отпора  $F_{гр}$  или сила сцепления  $F_c$ . Так как сила трения бетонных блоков о грунт равна произведению коэффициента трения  $f_b$  бетона о грунт на силу нормального давления  $N$ , то очевидно сдвиг полотна возможен, если

$$f_{л} N > f_b N + F_{гр} \quad (3.1)$$

для бетонных блоков, заглубленных в рыхлый песчано-иловый грунт, или

$$f_{л} N > f_b N + F_c \quad (3.2)$$

для УГЗБМ, уложенных на твердый песчано-глинистый грунт без заглубления бетонных блоков.

Если полотно защиты уложено на каменистый грунт, то условие сдвига полотна защиты запишется в виде:  $f_{л} > f_b$ .

Так как наименьший коэффициент трения бетонных блоков о грунт равен 0,2 (что соответствует трению бетона о мокрую глину), а наибольший коэффициент трения льда по бетону, согласно [9], равен 0,14, то очевидно, что защита трубопровода подводного перехода с использованием УГЗБМ всегда будет устойчива от воздействия ледяного затора, независимо от модели УГЗБМ, скорости потока и свойств грунта.

### **3.3. Выводы и предложения**

1. Для предотвращения образования затора льда у трубопровода подводного перехода, защищенного УГЗБМ, угол наклона полотна защиты к горизонту необходимо выполнять не более  $80^{\circ}$ .

2. Защита трубопровода подводного перехода с использованием УГЗБМ всегда устойчива от воздействия льда, независимо от модели УГЗБМ, скорости потока и свойств грунта.

3. Ширина полотна защиты из УГЗБМ не лимитируется воздействием на нее ледяного затора, а определяется только воздействием потока воды.

## 4. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКА ВОДЫ НА БЕРЕГОВОЙ ОТКОС, ЗАЩИЩЕННЫЙ УГЗБМ

### 4.1. Формулировка задачи

Защита берегового откоса выполнена с использованием УГЗБМ. Найти максимальную скорость течения реки, которую выдержит полотно УГЗБМ различных моделей, уложенных на выровненный береговой откос. Подмыв полотна из УГЗБМ исключен.

### 4.2. Математическое обоснование задачи

Рассмотрим береговой откос с углом наклона  $\alpha$  к горизонту, защищенный УГЗБМ и находящейся под действием потока воды (рис.8).

На каждый бетонный блок будут действовать следующие силы:

1) Вес бетонного блока  $G$ , уменьшенный на величину архимедовой силы  $P_a$ . Эту силу можно разложить на две составляющие силы: силу нормального давления  $N = (G - P_a) \cos \alpha$  и сдвигающую силу  $H = (G - P_a) \sin \alpha$

2) Сила гидродинамического давления воды  $F_d$ , определяемая по формуле (1.3).

Геометрическая сумма сил  $F_d$  и  $H$  дает результирующую силу  $F_e = \sqrt{F_d^2 + H^2}$ , сдвигающую блок вдоль берегового откоса.

Сдвигу бетонного блока препятствуют сила трения, равная произведению силы нормального давления  $N$  и коэффициента трения  $f$ , и сила сопротивления грунта, определяемая как сила сцепления  $F_c$  или сила пассивного отпора грунта  $F_{гр}$  при погружении в него бетонных блоков.

Тогда предельное состояние, при котором полотно УГЗБМ выдерживает воздействие потока воды, определяется выражением:

$$\sqrt{F_d^2 + H^2} = fN + F_{гр} \quad (4.1)$$

Используя формулу (1.3) и связь сил  $N$  и  $H$  с углом откоса  $\alpha$  из этого выражения можно получить формулу для вычисления максимальной скорости течения, которую выдерживает полотно УГЗБМ, уложенное на береговой откос с заглублением бетонных блоков, в виде:

$$U = \sqrt{\frac{2q(G - P_a)}{C_d \cdot \gamma_b} \sqrt{\left[ f \cos \alpha + \frac{F_{гр}}{(G - P_a)} \right]^2 - \sin^2 \alpha}}, \quad (4.2)$$

где  $C_d$  - коэффициент лобового сопротивления, принимаемый, согласно [3], равным 1,5.

При вычислении скорости по этой формуле значения сил  $G$ ,  $P_a$  и  $F_{гр}$ , а также площади  $S$  миделевого сечения бетонных блоков УГЗБМ различных моделей берутся из табл.1.9.

Если УГЗБМ уложено на твердый грунт берегового откоса без за-  
глубления бетонных блоков, то для вычисления максимальной скорости по-  
тока необходимо в формулу (4.2), вместо силы пассивного отпора грунта  $F_{гр}$ ,  
подставить значение силы сцепления, определяемой как произведение коэф-  
фициента сцепления  $C$  на площадь контакта бетонного блока с грунтом  $S_c$ .  
При этом значения  $S$  и  $S_c$  берутся из табл. 1.1.

Необходимо отметить, что скорость, найденная по формуле (4.2), яв-  
ляется скоростью потока непосредственно у берегового откоса. Для получе-  
ния средней скорости течения реки  $U_{cp}$  также необходимо эту скорость ум-  
ножить на коэффициент 1,43, т.е.  $U_{cp} = 1,43 U$ .

### 4.3. Результаты вычислений

Результаты вычислений максимальной скорости течения реки, кото-  
рую выдерживает полотно УГЗБМ, уложенное на песчано-иловый береговой  
откос с заглублением бетонных блоков в грунт, приведены в табл. 4.1. При  
расчетах принималось условие, что все бетонные блоки полотна УГЗБМ за-  
глублены в грунт до основания пирамиды, а коэффициент трения бетонного  
блока о грунт принимался равным:  $f = 0,35$ .

**Таблица 4.1.**

Значения максимальной средней скорости течения реки  $U_{cp}$ ,  $\frac{м}{с}$ , ко-  
торую выдерживает полотно УГЗБМ, уложенное на песчано-иловый берего-  
вой откос с заглублением бетонных блоков.

Угол откоса $\alpha^0$	0	10	20	30	40	50	60
Модель № 1	5,82	5,81	5,74	5,63	5,49	5,32	5,12
Модель № 2	5,2	5,17	5,07	4,91	4,68	4,37	3,98
Модель № 4	10,5	10,49	10,42	10,3	10,17	10	9,8
Модель № 6	8,01	7,99	7,95	7,88	7,78	7,67	7,54

Как видно из таблицы, угол берегового откоса мало влияет на спо-  
собность УГЗБМ сопротивляться воздействию потока воды, и даже при углах  
 $\alpha$  значительно превышающих угол естественного откоса для данного грунта  
( $\alpha \approx 30^0$  табл. 1.5), критическая скорость для всех моделей остается доста-  
точно высокой, более  $4 \frac{м}{с}$ .

Наибольшей сопротивляемостью сдвигу обладает модель УГЗБМ  
№ 4, а наименьшей – модель № 2, что объясняется меньшим заглублением в  
грунт бетонных блоков этой модели. Несмотря на большее заглубление в  
грунт бетонных блоков модели № 6 по сравнению с моделью № 4, она не-  
сколько уступает ей по сопротивляемости сдвигу, что связано с меньшей  
площадью миделевого сечения в модели № 4, по сравнению с моделью № 6.



При угле откоса  $\alpha = 0^0$  значения максимальной скорости течения реки совпадают со значениями скорости (табл. 1.9), вычисленными для различных моделей УГЗБМ, уложенных на горизонтальное дно. Это подтверждает правильность выбранной расчетной модели и проведенных расчетов.

В качестве примера в табл. 4.2 приведены значения максимальной скорости течения реки, которую выдерживают полотна УГЗБМ различных моделей, уложенные на твердый песчано-глинистый береговой откос без заглабления бетонных блоков в грунт. При этом в расчетах коэффициент трения принимался равным:  $f = 0,2$ ; а коэффициент сцепления  $C = 0,04 \text{ кг/см}^2$ .

**Таблица 4.2.**

Значения максимальной скорости течения реки  $U_{\text{ср}}, \text{ м/с}$ , которую выдерживает полотно УГЗБМ, уложенное на твердый песчано-глинистый береговой откос без заглабления бетонных блоков

Угол откоса $\alpha^0$	0	10	20	30	40	50	60
Модель № 1	2,89	2,86	2,76	2,59	2,31	1,79	0
Модель № 2	6,69	6,68	6,66	6,64	6,62	6,58	6,54
Модель № 4	3,46	3,44	3,38	3,28	3,13	2,95	2,72
Модель № 6	1,54	1,41	0	0	0	0	0

В этом случае, как видно из таблицы, наибольшей сопротивляемостью сдвигу обладает УГЗБМ модели № 2, что объясняется, относительно, большей площадью контакта бетонного блока этой модели с грунтом, а наименьшей сопротивляемостью – УГЗБМ модели № 6 из-за малой площади контакта. Из табл. 4.2 также видно, что и в этом случае, при небольших значениях угла откоса  $\alpha$  (меньше угла естественного откоса  $\varphi \approx 15^0$  для глинистого грунта), критическая скорость мало зависит от угла откоса. Однако при больших значениях  $\alpha$ , скорость может оказаться равной нулю, что говорит о том, что в данных условиях полотно УГЗБМ, уложенное без заглабления блоков в грунт, будет сползать по откосу даже под действием только силы тяжести.

#### **4.4. Выводы и предложения**

1. Результаты вычисления показывают, что все модели УГЗБМ, уложенные на береговой откос с заглаблением бетонных блоков в грунт, обладают достаточной сопротивляемостью воздействию водного потока. Максимальная скорость течения реки, которую выдерживают УГЗБМ в этом случае, при углах откоса меньше естественного, составляет более  $5 \text{ м/с}$ , что значительно превосходит скорости течения реально существующих рек.

2. При защите твердого песчано-глинистого берегового откоса может быть использованы УГЗБМ модели № 2, уложенные и без заглабления бетонных блоков в грунт.

3. УГЗБМ модели № 6 использовать для защиты берегового откоса без заглабления бетонных блоков в грунт не рекомендуется.

## **5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА ЗАЩИЩЕННЫЙ УГЗБМ БЕРЕГОВОЙ ОТКОС**

### **5.1. Формулировка задачи**

Защита берегового откоса выполнена с использованием УГЗБМ. Найти максимальную толщину проплывающих вдоль берегового откоса льдин, воздействие которых выдержит полотно УГЗБМ различных моделей, при скорости течения непосредственно вдоль полотна до  $4,5 \text{ м/с}$ .

### **5.2. Математическое обоснование задачи.**

Рассмотрим ледяное поле, движущееся в период ледохода вдоль фронта берегового откоса, защищенного УГЗБМ, плотно соприкасаясь с ним (рис. 9 Приложения). Между движущейся льдиной и соприкасающимися с ней бетонными блоками УГЗБМ при этом будут возникать силы взаимодействия, в результате которых может произойти смещение блоков и повреждение защиты.

Рассмотрим основные силы, действующие на бетонный блок. Льдина примерно прямоугольного в плане очертания площадью  $W$  и толщиной  $h$  движется со скоростью  $U$ , обладая известным запасом кинетической энергии. При встрече с береговым откосом льдина передает каждому соприкасающемуся с ней бетонному блоку УГЗБМ горизонтальную силу динамического давления  $F_r$ , которая может быть разложена на две составляющие силы: нормальную составляющую силу  $N = F_r \sin \alpha$ , прижимающую блок к грунту, и силу  $F_b = N f_l$ , действующую вдоль откоса, и стремящуюся сдвинуть бетонный блок. За счет продольного движения льдины вдоль откоса, бетонный блок будет испытывать продольное давление льда силой  $F_{пр} = N f_l$ . Общая сдвигающая сила  $F_{сдв}$  будет равна геометрической сумме этих сил:

$$F_{сдв} = \sqrt{F_b^2 + F_{пр}^2} = \sqrt{2} f_l N. \quad (5.1)$$

Этой силе будут противодействовать сила трения бетонных блоков о грунт и силы  $F_{гр}$  и  $F_c$

Условие сдвига бетонных блоков УГЗБМ, заглубленных в грунт, запишется в виде:

$$\sqrt{2} f_l N > f_b N + F_{гр}; \quad (5.2)$$

для УГЗБМ, уложенных на твердый песчано-глинистый грунт без заглубления бетонных блоков:

$$\sqrt{2} f_l N > f_b N + F_c; \quad (5.3)$$

для УГЗБМ, уложенных на каменистый грунт:

$$\sqrt{2} f_{л} > f_{б} \quad (5.4)$$

Принимая наибольшее значение коэффициента трения льда по бетону, согласно [ 9 ], равным:  $f_{л} = 0,14$ , а коэффициенты трения бетонных блоков о грунт соответственно: для песчано-илового грунта  $f_{б} = 0,35$ ; песчано-глинистого  $f_{б} = 0,2$ , а каменистого  $f_{б} = 0,6$ , видим, что неравенства (5.2), (5.3) и (5.4) не выполняются даже при  $F_{гр}$  и  $F_{с}$  равных нулю.

Это говорит о том, что защита берегового откоса устойчива против воздействия льда при любых скоростях течения.

При этом максимально возможная величина нормальной составляющей силы давления льда на защищенный УГЗБМ береговой откос может быть определена из условия прочности льда разрушению [ 9 ] по формуле:

$$N_{\max} = R_{см} h k, \quad (5.5)$$

где  $R_{см}$  - предел прочности льда сжатию;

$h$  - толщина льдины;

$k$  - коэффициент неплотности соприкосновения, принимаемый в пределах от 0,4 до 0,7.

Предел прочности льда сжатию можно принимать равным [ 9 ]:

для рек Севера и Сибири  $R_{см} = 50 \text{ т/м}^2$ ;

для рек Европейской части  $R_{см} = 30 \text{ т/м}^2$

Следовательно,  $N_{\max} = (12 \div 35) h \text{ т/пог.м}$

### **5.3 Выводы и предложения**

1. Защита берегового откоса, выполненная с использованием УГЗБМ всех моделей, устойчива против воздействия льда при любых скоростях течения и свойств защищаемого грунта.

2. Максимально возможная величина силы давления льда на защиту из УГЗБМ лимитируется только пределом прочности льда разрушению.

## **6. УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ПРЕДМЕТОВ НА СООРУЖЕНИЯ, ЗАЩИЩЕННЫЕ УГЗБМ**

### **6.1. Формулировка задачи**

Защита объекта выполнена с использованием УГЗБМ. Найти минимальную скорость течения, при которой перемещающиеся течением воды предметы могут разрушить бетонный блок УГЗБМ каждой модели или разорвать арматурный соединительный канат прочностью 2000 или 5000 кг.

### **6.2. Математическое обоснование задачи**

В работе [2] было показано, что разрушение бетонного блока УГЗБМ, при столкновении с перемещающимся потоком воды предметами, может произойти путем его ударного раскалывания с образованием трещин. При этом раскалывающее ударное усилие  $F_z$  определяется по формуле [2]:

$$F_z = 2h_{\max} b \sigma_{сж} \operatorname{tg}^{\alpha/2}, \quad (6.1)$$

где

$$h_{\max} = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \cdot \frac{a^2}{b} \cdot \frac{(1 + f \operatorname{tg} \alpha/2)}{(1 - f \operatorname{tg} \alpha/2)}, \quad (6.2)$$

$\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  - предельные допустимые напряжения растяжения и сжатия бетона;

$a$  – общая высота бетонного блока;

$b$  – ширина вершины блока;

$f$  - коэффициент трения тела по бетону;

$\alpha$  - острый угол ударяемого тела.

Приравнивая изменение кинетической энергии ударяемого тела к потенциальной энергии деформации бетонного блока в работе [2] получено следующее соотношение, выражающее условие раскалывания бетонного блока:

$$mU^2 \geq F_z h_{\max}, \quad (6.3)$$

где  $m$  и  $U$  – соответственно масса и скорость ударяющего предмета.

С другой стороны гидравлическая крупность тела, т.е. скорость равномерного движения тела в жидкости определяется по известной формуле [3]:

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} q \frac{d_3 (\gamma_T - \gamma_b)}{C_d \gamma_T}}, \quad (6.4)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр тела;

$C_d$  – коэффициент сопротивления давления, для шарообразного тела

$$C_d \approx 0,44 [3];$$

$\gamma_T$  и  $\gamma_b$  – объемный вес тела и воды.

Учитывая, что масса тела выражается через объемный вес тела и его эквивалентный диаметр, решая совместно уравнения (6.1), (6.3) и (6.4) можно получить минимальную скорость течения воды, при которой посторонние предметы могут разрушить бетонные блоки УГЗБМ.

При расчете соединительного арматурного каната УГЗБМ на разрыв от удара посторонним предметом необходимо учитывать, что, так как каждый бетонный блок удерживается 4 канатами, то, очевидно, что при центральном ударе нагрузка, действующая на бетонный блок, распределяется равномерно на все четыре каната [2]. При неблагоприятном внецентренном ударе постороннего тела по краю бетонного блока произойдет поворот блока относительно противоположной грани, а ударную нагрузку воспримут на себя только три каната. При этом максимальная допустимая нагрузка на бетонный блок составляет удвоенную допустимую нагрузку на разрыв соединительного каната, причем половину этой нагрузки будет воспринимать ближайший к месту удара канат, а на боковые канаты будет действовать нагрузка, равная половине их разрывного усиления [2].

Так как длительность удара постороннего предмета о бетонный блок равна времени прохождения фронта волны упругой деформации по толщине бетонного блока туда и обратно:  $\Delta t = 2a/U$ , где  $a$  – толщина блока;  $U$  – скорость звука в бетонном блоке, то можно считать, что время удара постороннего предмета о бетонный блок не зависит от характера разрушения УГЗБМ, или от разрушения бетонного блока, либо от разрыва арматурного каната.

Это положение позволяет определить скорость течения, при которой перемещающееся течением воды предметы могут разорвать арматурный канат. Применяя теорему импульсов, согласно которой:

$$mU = F_z \Delta t, \quad (6.5)$$

можно найти время удара  $\Delta t$  и по заданному разрывному усилию каната определить необходимое количество движения  $mU$  для разрыва каната. По найденному количеству движения с использованием формулы (6.4) определяется искомая скорость течения воды.

### 6.3. Результаты вычислений

Примем значения допустимых напряжений для бетона марки 400 равными [10]:  $\sigma_p = 25 \text{ кг/см}^2$  и  $\sigma_{сж} = 280 \text{ кг/см}^2$ .

Рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, когда постороннее тело производит удар по бетонному блоку углом плоскости среза, тогда  $\alpha = 90^\circ$ . Примем также коэффициент трения тела по бетону  $f = 0,6$ .

С учетом принятых значений величины  $F_z$  и  $h_{\max}$  определяются из выражений:

$$h_{\max} = 0,357 \frac{a^2}{b}; \quad F_z = 2 \times 10^6 \times a^2$$

Рассмотрим также самый неблагоприятный случай, когда ударяемое по бетонному блоку тело представляет собой переносимый водным потоком валун объемного веса  $\gamma_T = 3000 \text{ кг/м}^3$ . Тогда принимая объемный вес воды  $\gamma_b = 1000 \text{ кг/м}^3$  и учитывая, что масса тела в воде определяется по формуле:

$$m = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{(\gamma_T - \gamma_b)}{g} d_3^3, \quad (6.6)$$

из совместного решения уравнений (6.3) и (6.4) получим следующее выражение для вычисления минимальной скорости течения воды, при которой перемещаемые потоком предметы могут разрушить бетонный блок:

$$U_b = 2.58 \sqrt[8]{F_z \cdot h_{max}}. \quad (6.7)$$

При этом эквивалентный диаметр ударяемого тела, согласно (6.4), равен:

$$d_3 = \frac{3}{4} \cdot \frac{1000 \cdot 0,44 \cdot U^2}{(3000 - 1000) \cdot 9,81} = 0,0168U^2,$$

а его масса, согласно формуле (6.6), равна:

$$m = \frac{3,14 \cdot 2000}{6 \cdot 9,81} d_3^3 = 106,6 d_3^3. \quad (6.8)$$

Результаты расчетов по приведенным формулам основных параметров, соответствующих разрушению бетонных блоков УГЗБМ различных моделей приведены в табл. 6.1

**Таблица 6.1**

Результаты расчетов основных параметров, соответствующих разрушению бетонных блоков УГЗБМ

№ модели УГЗБМ	1	2	4	6
Высота бетонного блока а, м	0,24	0,06	0,15	0,24
Ширина вершины бетонного блока b, м	0,19	0,26	0,26	0,21
Глубина трещины $h_{max}$ , м	0,108	0,0049	0,031	0,098
Раскалывающее усилие $F_z$ , кг	$1,15 \times 10^3$	$7,13 \times 10^3$	$4,5 \times 10^4$	$1,15 \times 10^5$
Скорость течения U, м/с	8,38	4,02	6,37	8,28
Эквивалентный диаметр ударяемого тела $d_3$ , м	1,18	0,27	0,682	1,15
Масса ударяемого тела m, кг x $\frac{с^2}{м}$	175,3	2,1	33,8	162,3
Количество движения ударяемого тела mU, кг x с	1469	8,44	215,3	1343,8
Время удара $\Delta t$ , с	0,0128	0,00118	0,0048	0,0117

Результаты расчетов основных параметров, соответствующих разрыву арматурных соединительных канатов прочностью 2000 кГ и 5000 кГ приведены в табл. 6.2.

**Таблица 6.2.**

Основные параметры, соответствующие разрыву арматурного каната прочностью 2000 кГ (числитель) и 5000 кГ (знаменатель)

№ модели УГЗБМ	1	2	4	6
Ударная нагрузка на бетонный блок $F_6$ , кг	$\frac{4000}{10000}$	$\frac{4000}{10000}$	$\frac{4000}{10000}$	$\frac{4000}{10000}$
Время удара $\Delta t$ , с	0,0128	0,00118	0,0048	0,0117
Ударный импульс $F_6 \cdot \Delta t$ , кг·с	$\frac{51,2}{128}$	$\frac{4,72}{11,8}$	$\frac{19,2}{48}$	$\frac{46,8}{117}$
Скорость течения $v$ , м/с	$\frac{5,19}{5,91}$	$\frac{3,69}{4,2}$	$\frac{4,51}{5,14}$	$\frac{5,12}{5,84}$
Эквивалентный диаметр ударяемого тела $d_э$ , м	$\frac{0,452}{0,587}$	$\frac{0,229}{0,296}$	$\frac{0,342}{0,444}$	$\frac{0,44}{0,573}$
Масса ударяемого тела $m$ , $\frac{\text{кг}\cdot\text{с}^2}{\text{м}}$	$\frac{9,84}{21,56}$	$\frac{1,28}{2,76}$	$\frac{4,26}{9,33}$	$\frac{9,08}{20,05}$

#### **6.4. Выводы и предложения**

1. Проведенные расчеты показали что, для всех моделей УГЗБМ скорость потока, при которой защита может быть разрушена перемещающимся течением предметом достаточно велика, как по условию разрушения бетонных блоков, так и по условию разрыва арматурного соединительного каната.

2. Для всех моделей УГЗБМ (кроме модели № 4 с соединительным канатом прочностью 5000 кг) более слабым является соединительный канат.

3. Учитывая, что расчеты проведены для наиболее неблагоприятных случаев (удар постороннего тела острым углом только по одному бетонному блоку, внецентренный удар) и без учета упругих деформаций ударяемого предмета и грунта, на котором уложены УГЗБМ, можно заключить, что все модели УГЗБМ обладают достаточной надежностью и сопротивляемостью против ударного воздействия внешних предметов и могут быть рекомендованы для защиты сооружений от селевых потоков.



## 7. САМОПРОИЗВОЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ УГЗБМ ПО СКЛОНУ

### 7.1. Формулировка задачи

Рассчитать различие между углом естественного откоса, с одной стороны, и максимальным углом откоса, на котором уложенные УГЗБМ разных моделей держатся без дополнительного крепления к поверхности откоса, опираясь на горизонтальное основание, с другой стороны.

### 7.2. Математическое обоснование задачи

Поставленная задача является частным случаем задачи, рассмотренной в разделе 4. Отличием поставленной задачи является только то, что в ней будет отсутствовать сила гидродинамического давления воды на бетонный блок, а единственной действующей силой будет вес бетонного блока  $G$ . Эта сила направлена вертикально вниз и может быть разложена на две составляющие силы: силу нормального давления  $N = G \cos\alpha$  и сдвигающую силу  $H = G \sin\alpha$ .

Сдвигу бетонного блока препятствует сила трения, равная произведению коэффициента трения  $f$  и силы нормального давления  $N$ , и сила сопротивления грунта, определяется как  $F_c$  или  $F_{гр}$ .

Тогда предельный угол откоса, при котором полотно УГЗБМ, уложенное с заглублением бетонных блоков в грунт, держится без дополнительного крепления, можно определить из соотношения:

$$F_{гр}/G \geq \sin\alpha - f\cos\alpha. \quad (7.1)$$

Предельный угол откоса, при котором держится полотно УГЗБМ, уложенное на твердый грунт без заглубления бетонных блоков, дает соотношение:

$$\frac{F_c}{G} \geq \sin\alpha - f\cos\alpha \quad (7.2)$$

Соотношения (7.1) и (7.2) можно также получить непосредственно из формулы (4.2), полагая в ней  $U = 0$  и  $P_a = 0$ .

### 7.3. Результаты вычислений

Выражения (7.1) и (7.2) показывают, что при отсутствии силы сопротивления грунта  $F_{гр}=0$  и  $F_c=0$  предельный угол откоса определяется только коэффициентом трения  $f$ , т.е.  $\operatorname{tg}\alpha = f$ . Этот случай соответствует соскальзыванию УГЗБМ с ровной каменистой поверхности. По данным [4] коэффициент трения бетонной плиты о такую поверхность составляет  $f = 0,6 \div 0,75$ , чему соответствует предельный угол  $\alpha = 30 \div 40^\circ$ . Однако ровный каменистый склон очевидно нет целесообразности укреплять УГЗБМ, поэтому оценим предельный угол откоса для песчано-илового и песчано-глинистого грунтов.

Результаты расчета действующих сил и максимального угла откоса, на крутом уложенные с заглублением бетонных блоков в рыхлый песчано-иловый грунт ( $f = 0,35$ ) УГЗБМ различных моделей держатся без дополнительного крепления представлены в табл. 7.1

**Таблица 7.1**

Значения сил и предельный угол откоса для УГЗБМ различных моделей, уложенных на рыхлый песчано-иловый грунт с заглублением бетонных блоков

№ модели УГЗБМ	1	2	4	6
Сила тяжести блока $G$ , кг	34,8	11,08	22,94	26,5
Сила отпора грунта $F_{гр}$ , кг	30,3	6,33	30,3	37,6
Предельный угол откоса $\alpha$ , град	75	52	90	90

Как видно из таблицы в данном случае УГЗБМ модели № 4 и № 6 держатся без дополнительного крепления даже на вертикальном откосе, т. к. для этих моделей сила отпора грунта  $F_{гр}$  превышает силу тяжести бетонного блока. Для УГЗБМ модели № 1 и № 2 предельные углы откоса составляют соответственно  $75^{\circ}$  и  $52^{\circ}$ , однако и эти значения намного превышают угол естественного откоса этого грунта ( $\varphi \approx 28^{\circ}$  табл. 1.5).

Результаты расчета действующих сил и максимального угла откоса, на котором уложенные без заглубления бетонных блоков на твердый песчано-глинистый грунт ( $f = 0,2$ ;  $c = 0,04$  кг/см<sup>2</sup>) УГЗБМ различных моделей держатся без дополнительного крепления представлены в табл. 7.2

**Таблица 7.2**

Значения сил и предельный угол откоса для УГЗБМ различных моделей, уложенных на твердый песчано-глинистый грунт без заглубления бетонных блоков

№ модели УГЗБМ	1	2	4	6
Сила тяжести блока $G$ , кг	34,8	11,08	22,94	26,5
Сила сцепления грунта $F_c$ , кг	14,44	27,04	14,44	1,96
Предельный угол откоса $\alpha$ , град	35	90	49	16

Как видно из таблицы в этом случае наибольшей сопротивляемостью против сползания с откоса обладает УГЗБМ модели № 2. Бетонные блоки этой модели, удерживаются даже на вертикальном откосе. Это обусловлено значительной силой «присасывания» бетонных блоков этой модели к грунту, связанное с большой площадью контакта.

Из-за малой площади контакта бетонных блоков УГЗБМ модели № 6 с грунтом и, следовательно, малой силой сцепления  $F_c$ , защитное полотно этой модели обладает наименьшей сопротивляемостью против сползания с откоса. Однако и в этом случае максимальный угол откоса, на котором уложенные УГЗБМ модели № 6 держатся без дополнительного крепления, превышает угол естественного откоса грунта ( $\varphi = 15^\circ$ , табл. 1.5)

#### ***7.4. Выводы и предложения***

Так как при укреплении различных склонов полотна УГЗБМ укладываются на откосах, как правило, с заглублением бетонных блоков в грунт, то максимальный угол откоса, на котором уложенные УГЗБМ любой модели держатся без дополнительного крепления, значительно превышает угол естественного откоса данного грунта.

## ***РЕКОМЕНДАЦИИ***

На основании проведенных гидравлических расчетов Универсальные гибкие защитные бетонные маты (УГЗБМ) могут быть рекомендованы как эффективное средство для защиты подводных переходов трубопроводов, при строительстве дорог, защиты опор мостов, укреплении берегов, защиты дна акваторий портов, возведения временных противопаводковых сооружений.

## ***ЗАКЛЮЧЕНИЕ***

Анализ результатов проведенных расчетно-теоретических исследований дает возможность сделать следующее заключение.

1. Защита из УГЗБМ всех моделей, уложенная на песчано-иловое или песчано-глинистое дно водотока, обладает достаточной сопротивляемостью процессу скручивания и дрейфа под действием потока воды практически при всех реально существующих скоростях течения равнинных рек.

2. Защита из УГЗБМ трубопровода подводного перехода выдерживает значительные силы давления потока воды при всех применяемых стандартных диаметрах труб, различных грунтах и всех реально существующих скоростях течения реки.

3. Защита из УГЗБМ, уложенная на береговой откос с заглублением бетонных блоков в грунт, достаточно надежно выдерживает значительные силы давления потока воды и не требует дополнительного крепления полотна к грунту.

4. Защита из УГЗБМ не может быть разрушена динамическим воздействием льда на защищаемое сооружение, а также надежно противостоит силе давления льда при образовании ледяных заторов.

5. Защита из УГЗБМ надежно выдерживает многочисленные удары различных предметов, переносимых потоком воды.

6. Защита из УГЗБМ всех моделей надежно держится без дополнительного крепления на откосе, угол которого значительно превышает угол естественного откоса данного грунта.

## ***СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ***

1. Технические условия: Универсальный гибкий защитный бетонный мат (УГЗБМ); ТУ 585900-001-35842586-2004, Воронеж, 2005.-11с.

2. Исследование универсальных гибких защитных бетонных матов (УГЗБМ) Гидравлические расчеты, технический отчет по договору № 09/05-10, Воронеж, 2005.-35с.
3. Примеры расчетов по гидравлике. Под редакцией А.Д. Альтшуля.- М.: Стройиздат, 1976.-255с.
4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-625с.
5. Левин С.И. Подводные трубопроводы.-М.: «Недра», 1970.-288с.
- 6.Бородавкин П.П., Таран В.Д. Трубопроводы в сложных условиях.- М.: «Недра»,1968.-304с.
7. Юфин А.П. Гидромеханизация.-М.: Стройиздательство,1974.-224с.
8. СНИП 2.05.06-85 (2000) «Магистральные трубопроводы».
9. Коржавин К.Н. Воздействие льда на инженерные сооружения.- Новосибирск, из-во СОАН СССР,1962.-198с.
10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.-М.:» Наука», 1970.-544с.

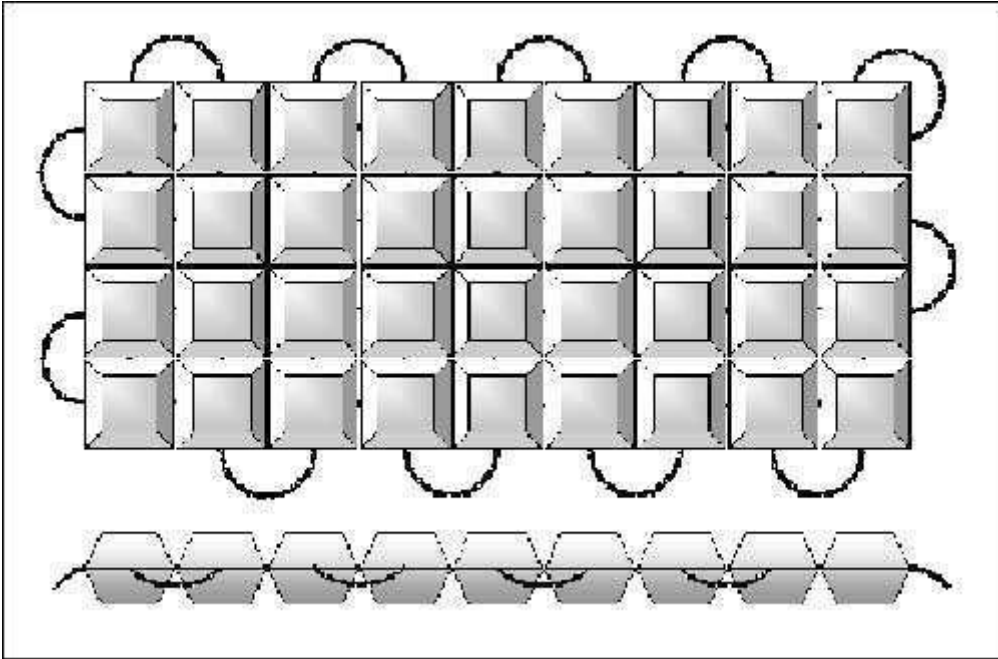


Рис.1 Конструкция УГЗБМ модели №1

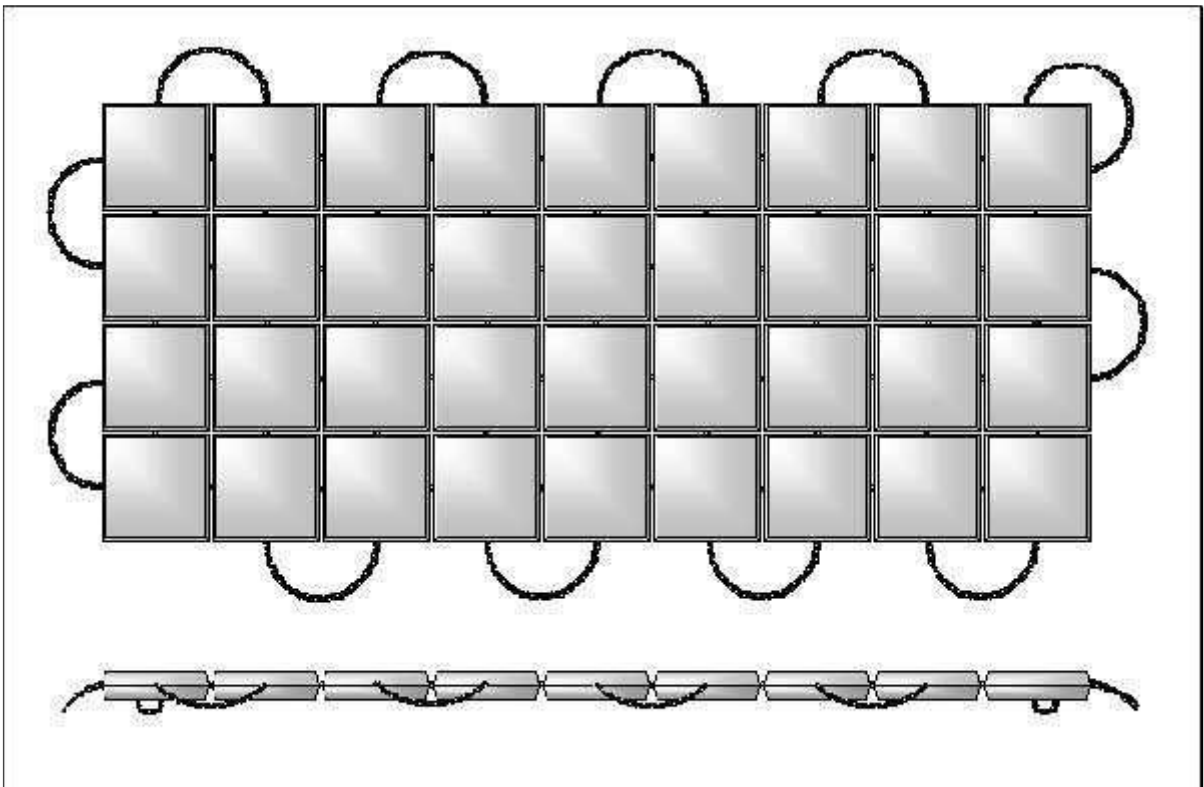


Рис.2 Конструкция УГЗБМ модели №2

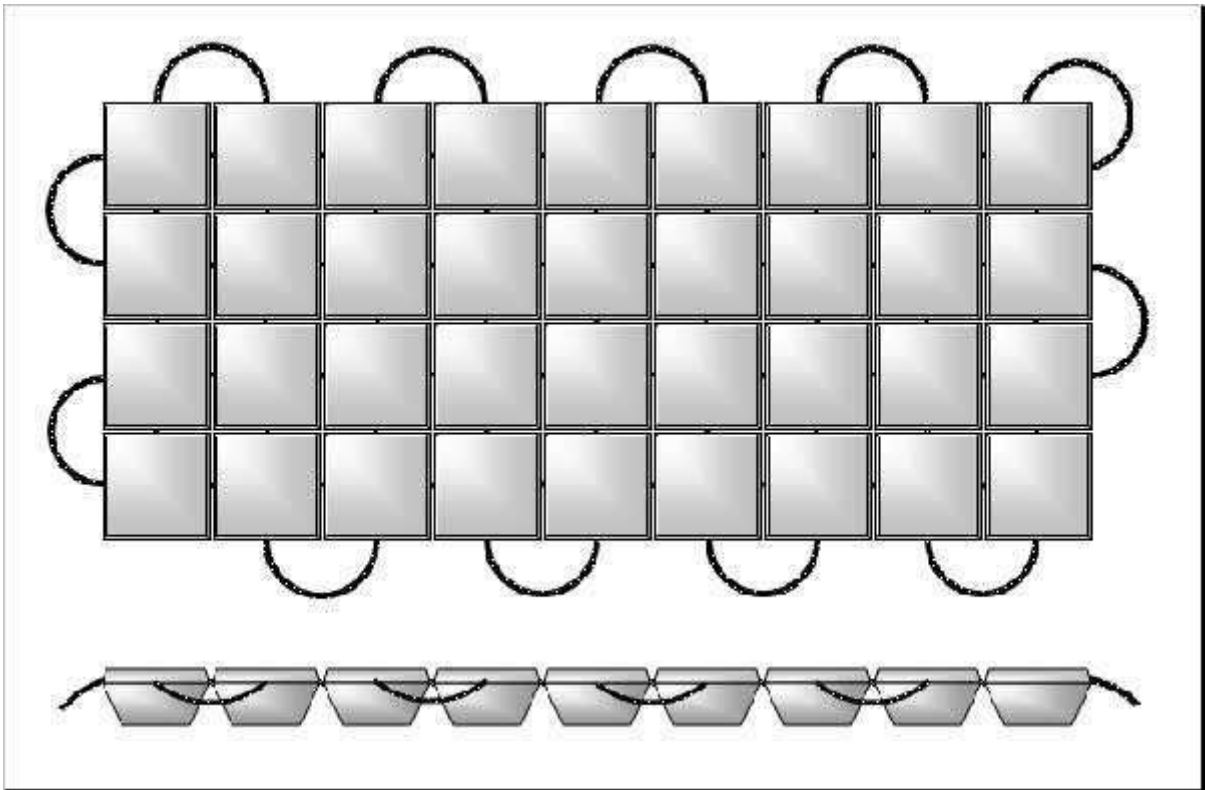


Рис.3 Конструкция УГЗБМ модели №4

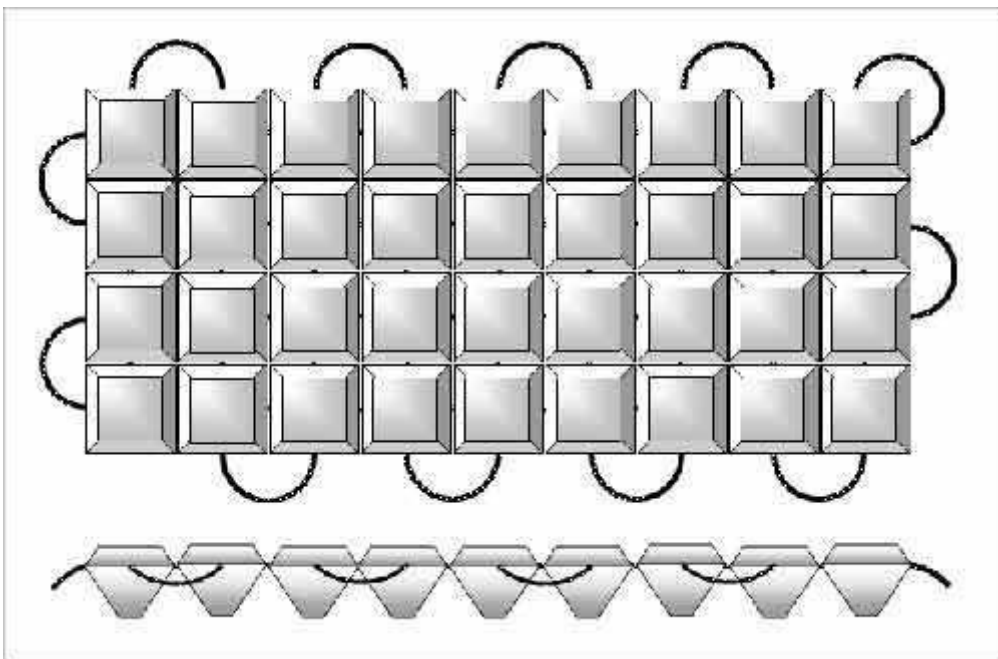


Рис.4 Конструкция УГЗБМ модели №6



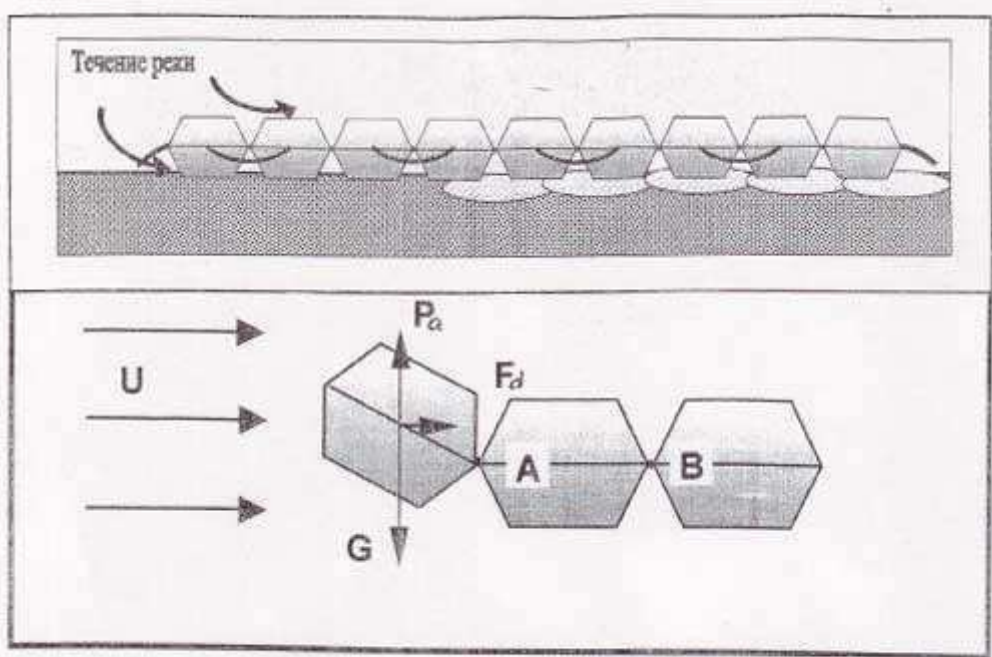


Рис.5.Схема воздействия потока на первый ряд блоков УГЗБМ

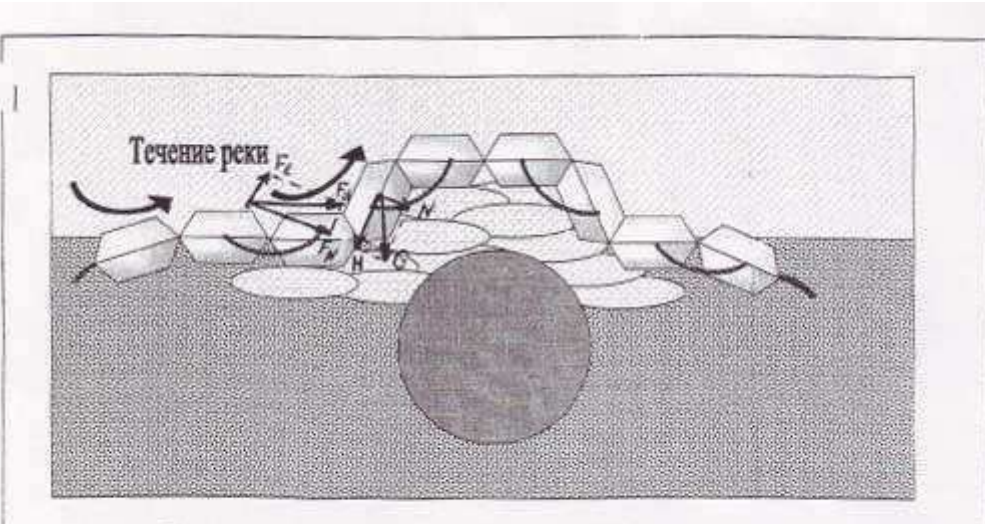


Рис.6.Схема :защиты подводного перехода трубопровода УГЗБМ

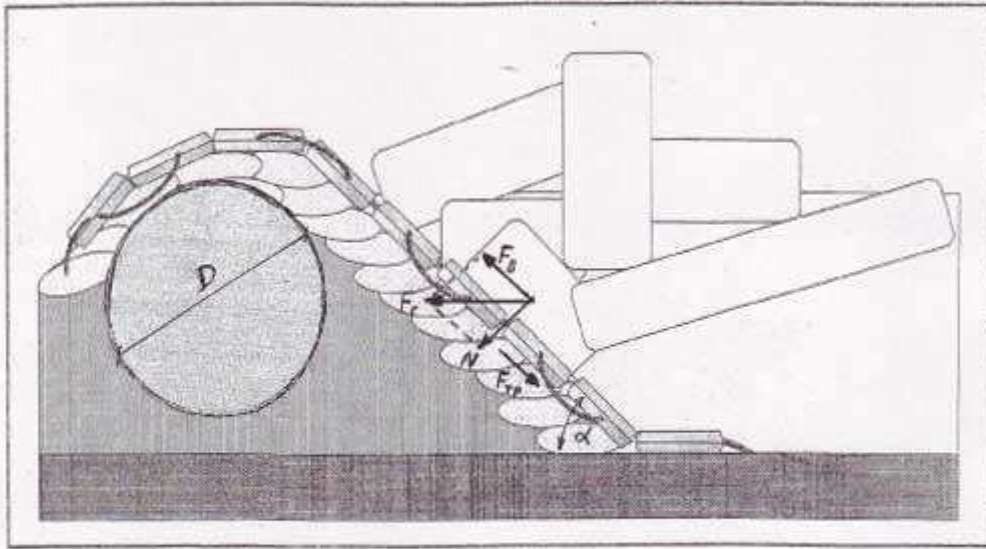


Рис.7. Схема воздействия льда на подводный переход трубопровода, защищенного УЗБМ

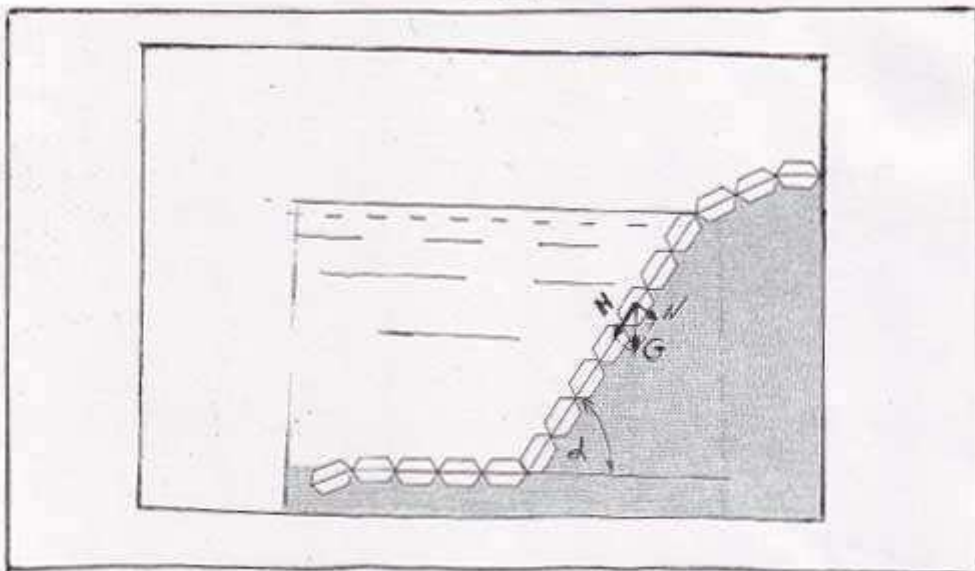


Рис.8. Схема воздействия потока на береговой откос, защищенный УЗБМ

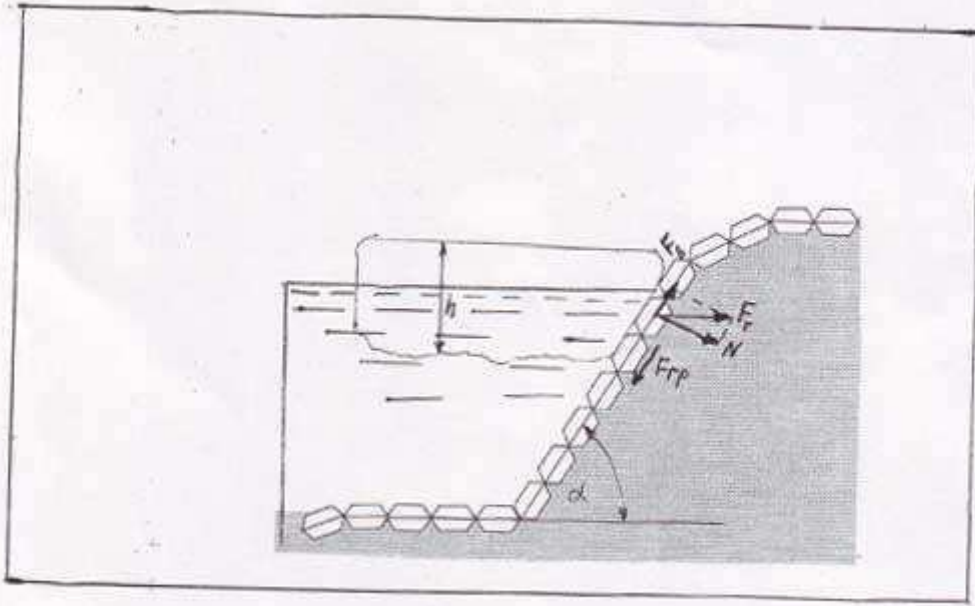


Рис.9. Схема воздействия льда на защищенный УЗБМ береговой откос

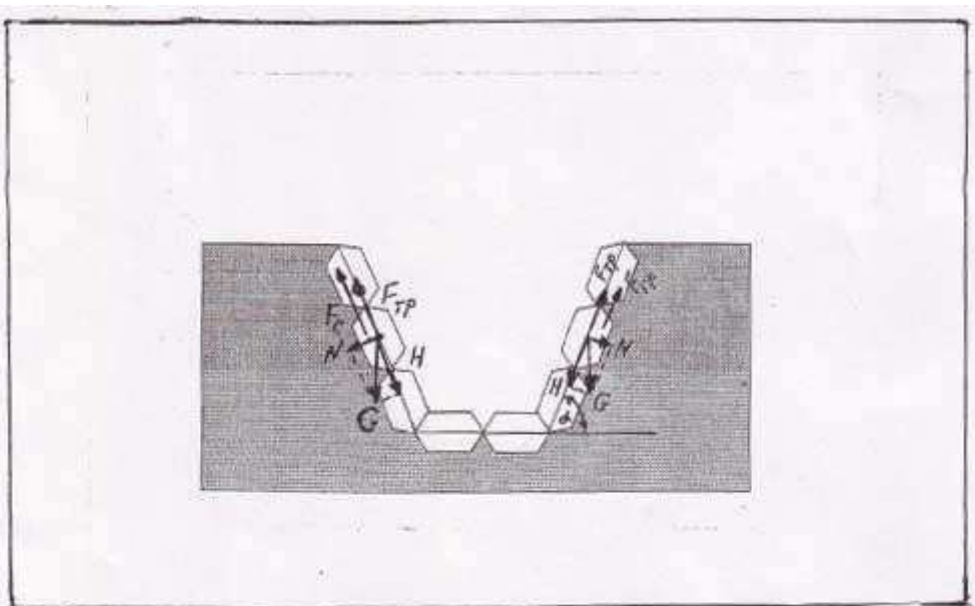


Рис.10. Расчетная схема к определению смещения УЗБМ по склону