Общество с ограниченной ответственностью «Спецпром 1»

Утверждаю
Директор
ООО «Спецпром 1»

_____ Н.В. Ревенков

«4» июня 2014 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ БЕТОННОГО ЗАЩИТНОГО ГИБКОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО (ПБЗГУ) ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Гидравлические расчеты

Расчеты выполнил профессор
кафедры гидравлики, водоснабжения
и водоотведения
Воронежского государственного
архитектурно-строительного
университета к.т.н.
Дроздов Е.В.

Воронеж-2014

Содержание

Введение…… 3
1. Нагрузки и воздействие потока воды на подводный трубопровод, защищенный ПБЗГУ……. 7
   1.1 Расчет устойчивости трубопровода на всплытие……..…….. 8
   1.2 Расчет устойчивости трубопровода на сдвиг…… 12
   1.3 Оценка снижения вибрационных нагрузок на трубопровод, защищенный ПБЗГУ……... 16
2. Использование ПБЗГУ для защиты подводного трубопровода от повреждений…….. 23
   2.1 Защита от повреждений и деформаций самой трубы……... 23
   2.2 Защита от повреждений изоляции и футеровки подводного трубопровода…… 27

Заключение…… 29
Рекомендации…… 30
Список использованной литературы…….. 31
Приложение……... 32

Введение

Подводные трубопроводы находят широкое применение при пересечении водных преград магистральными трубопроводами, для выпуска сточных вод в водоемы и водотоки, как трубопроводы водозаборных сооружений, трубопроводы морских нефтегазовых месторождений, морских рейдовых нефтепричалов и т.д.

В качестве подводных используют трубопроводы, выполненные из различных материалов: металлические, железобетонные, пластмассовые, асбестоцементные и другие. Такие трубопроводы, 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 выполненных работ.

При проектировании и строительстве подводных трубопроводов должны быть предусмотрены и выполнены специальные мероприятии, которые обеспечили бы надежную, безаварийную его эксплуатацию в течение длительного времени. Так, например, необходимо исключить возможность воздействия на подводные трубопроводы льда, плавающего леса, топляка и других предметов, предохранить изоляцию трубопровода от повреждений, обеспечить балластировку или утяжеление трубопроводов, обладающих положительной плавучестью, а также исключить деформацию русла под трубопроводом и механические повреждения трубопроводов судовыми якорями, лотами и другими предметами. Вместе с тем, часто выполнение заглубления подводных трубопроводов ниже предельного уровня размыва русла весьма затруднительно, а при пересечении рек с быстрым течением, сложенных легкоразмываемыми мелкопесчаными грунтами, практически невозможно. Подводная траншея в этих условиях до укладки трубопровода быстро заносится грунтом. При этом возникает сложная задача обеспечения надежности эксплуатации подземных трубопроводов, прокладываемых выше предельного уровня размыва.

В процессе эксплуатации подводные трубопроводы постоянно находятся в напряженном состоянии, вызываемым различными нагрузками и воздействиями. Устойчивость подводного водопровода зависит от силового воздействия потока и величины отрицательной плавучести. Для нефте- и продуктопроводов необходимая отрицательная плавучесть обеспечивается, как правило, весом продукта и труб, а для газопроводов – весом труб и искусственно создаваемой пригрузки 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 протаскивании трубопровода через водную преграду. Сплошное бетонирование связано со значительной трудоемкостью его нанесения, а

также приводит к увеличению жесткости трубопровода и, следовательно, увеличению минимального радиуса его кривизны при укладке [1,2].

Подводные трубопроводы подвергаются воздействию речного потока как в строительный период при укладке трубопровода, так и во время его эксплуатации, особенно при укладке трубопровода на дно или частичным оголением трубопровода в результате размыва дна в створе перехода водной преграды. Наиболее сложные условия работы возникают для трубопроводов, проложенных по дну водотоков или выше предельного профиля размыва русла реки и подверженных воздействию ледяного покрова как в зимний, так и, особенно, в весенний период. Наиболее опасно в период весеннего ледохода воздействие льда. При подъеме горизонта воды и ледяного покрова, а также передвижках льда происходит перемещение вмерзших в лед конструктивных элементов сооружения.

Имеющийся опыт эксплуатации подводных трубопроводных переходов [1,2] подтверждает опасность явлений гидродинамического воздействия водного потока, приводящих, зачатую, к разрушению сооружения или его отдельных элементов, и указывает на необходимость особого внимания к гидродинамическому воздействию и всем его проявлениям. Так, например, по данным [1], из 60 аварий на подводных переходах магистральных трубопроводов, причины которых установлены с достаточной достоверностью, в 52 случаях, что составляет 88,4%, в аварийное состояние приходили трубопроводы, не заглубленные в дно. Сюда же следует отнести разрывы труб при их вибрации, механических повреждениях и повреждениях льдом.

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

Покрытие ПБЗГУ собирается из плит, состоящих из 36 бетонных блоков соединенных между собой замоноличенным синтетическим канатом. Все плиты оснащены соединительными элементами для надежного соединения их в единое покрытие [3]. Габаритная длина ПБЗГУ составляет 2746 мм, габаритная ширина – 1226 мм.

В настоящее время в серийном производстве находятся три модели ПБЗГУ, отличающиеся типами применяемых бетонных блоков. Конструкция ПБЗГУ модели № 1, показанная на рис. 1 Приложения, выполнена из бетонных блоков типа 1 и имеет максимальную высоту 240 мм, массу 1220 кг; ПБЗГУ модели № 2 (рис. 2 Приложения) выполнена из бетонных блоков типа 2, имеет максимальную высоту 60 мм, массу 395 кг; ПБЗГУ модели № 4 (рис.3 Приложения) выполнена из бетонных блоков типа 4, имеет максимальную высоту 150 мм, массу 820 кг.

Бетонные блоки ПБЗГУ по форме представляют собой две усеченные пирамиды с общим квадратным основанием. Основные габаритные размеры бетонных блоков приведены в табл. 1.

ПБЗГУ изготовляют путем бетонирования в формообразующую оснастку. При изготовлении ПБЗГУ в качестве соединительного арматурного каната применяются искусственные канаты диаметром от 8 до 25 мм из полиамида (капрона), полипропилена или полиэфира (лавсана) с разрывной нагрузкой от 2000 до 10000 кг.

Таблица 1

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	300×300	190×190	120	200×200	120
Бетонный блок типа 2	300×300	260×260	30	265×265	30
Бетонный блок типа 4	300×300	260×260	30	200×200	120

Как показано в работе [4] ПБЗГУ надежно предохраняет защищаемое сооружение от размыва грунта, динамического воздействия льда и многочисленных ударов различных предметов, переносимых потоком воды. Применение ПБЗГУ для защиты подводных трубопроводов позволяет обеспечить достаточную прочность и устойчивость трубопровода при воздействии на него потока воды, исключает устройство подводной траншеи и необходимость дополнительной пригрузки трубопровода.

Защита из ПБЗГУ значительно снижает горизонтальную силу лобового сопротивления трубопровода подводного перехода и полностью исключает вертикальную подъемную силу. Это уменьшает возможность вибраций подводного трубопровода, которые могут привести к его разрушению. Применение ПБЗГУ, 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 ПБЗГУ избавляет также от необходимости выполнять футеровку трубопровода и позволяет протаскивать 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 службы подводного трубопровода, который при качественном выполне-

нии проекта и контроле за строительством будет равен или превышать расчетный срок эксплуатации всего магистрального трубопровода.

Однако, защищая подводный трубопровод от статического и динамического воздействия водного потока, а также воздействия ледяного покрова в зимний и весенний периоды, ПБЗГУ воспринимает эти воздействия на себя. Поэтому надежностью работы защиты, выполненной из ПБЗГУ, будет определяться надежность работы и всего подводного перехода.

В настоящей работе приводятся результаты расчетно-теоретического исследования гидродинамического воздействия потока на подводные трубопроводы, защищенные ПБЗГУ.

1. Нагрузки и воздействие потока воды на подводный трубопровод, защищенный ПБЗГУ

Подводные трубопроводы подвергаются воздействию речного потока, как в строительный, так и эксплуатационный периоды. Проявляется оно в виде сравнительно постоянной или переменной по величине и направлению силы, которая вызывает иногда колебания трубопроводов значительной амплитуды, приводящей к разрушению труб. В практике эксплуатации подводных трубопроводов известны многочисленные примеры выброса труб из подводных траншей в результате силового воздействия потока, а также многочисленные аварии, связанные с разрушением различных участков подводных трубопроводов при их колебаниях [2].

Для расчета устойчивости трубопроводов особое значение имеет точное определение действующих сил в различных состояниях трубопровода под водой.

На трубопровод, проложенный по дну водотока без заглубления, действуют следующие силы:

1. Вес (сила тяжести) 1 м длины трубы, определяемый по формулам:

а) трубопровод без изоляции

$$G_{тр} = \rho_т g \frac{\pi (D_н^2 - D_в^2)}{4}, \qquad (1.1)$$

где $D_н$ и $D_в$ - наружный и внутренний диаметры трубы, м; $\rho_т$ - плотность материала трубы, $кг/м^3$ (для стальных труб $\rho_т = 7850\ кг/м^3$); g - ускорение свободного падения, $м/с^2$;

б) трубопровод с изоляцией

$$G_{из} = G_{тр} + \rho_{из} g \frac{\pi (D_{из}^2 - D_н^2)}{4}, \qquad (1.2)$$

где $D_{из}$ - наружный диаметр трубы, покрытой изоляцией, м; $\rho_{из}$ - плотность изоляции, $кг/м^3$;

в) трубопровод с изоляцией и футеровкой

$$G_ф = G_{из} + G_{фут}, \qquad (1.3)$$

где $G_{фут}$ - вес футеровки на 1 м трубы, $Н/м$.

2. Вес продукта, заполняющего трубу длиной 1 м:

$$G_{пр} = \rho_{пр} g \frac{\pi D_в^2}{4}, \qquad (1.4)$$

где $\rho_{пр}$ - плотность перекачиваемого продукта, $кг/м^3$.

3. В соответствии с законом Архимеда на трубопровод, погруженный в воду, действует сила, равная весу вытесненной им воды:

$$P_а = \rho_в g V, \qquad (1.5)$$

где $\rho_в$ - плотность воды ($\rho_т = 1000$ кг/м^3); V - объем воды, вытесняемый 1 м длины трубопровода, м^3.

4. При обтекании трубопровода потоком воды на него действуют динамические нагрузки, определяемые по формулам [2]:

а) горизонтальная сила гидродинамического давления:

$$P_г = C_x D_н \rho_в \frac{v^2}{2}, \qquad (1.6)$$

где C_x - коэффициент лобового сопротивления; v - скорость потока;

б) вертикальная подъемная сила:

$$P_в = C_y D_н \rho_в \frac{v^2}{2}, \qquad (1.7)$$

где C_y - коэффициент подъемной силы.

Следует иметь в виду, что вертикальная подъемная сила $P_в$ является следствием несимметричного обтекания трубопровода потоком воды, поэтому она возникает только при расположении трубопровода на дне русла. Если зазор между грунтом дна и трубой превышает 0,1 ее диаметра, то трубопровод рассчитывают только на лобовое сопротивление [1].

1.1. Расчет устойчивости трубопровода на всплытие

Подводный трубопровод будет устойчив на всплытие, если его вес с продуктом будет с достаточным запасом больше выталкивающей силы воды. Необходимая устойчивость подводного трубопровода достигается различными способами его пригрузки (сплошным утяжеляющим покрытием или отдельными грузами) или закреплением трубопроводов к основанию винтовыми анкерами. При расчетах устойчивости подводных трубопроводов на речных переходах воздействие на них веса грунта обычно не учитывается, что соответствует трубопроводам, заглубление которых определяется предельным профилем размыва русла. При этом предполагается, что трубопровод должен сохранять устойчивое положение на дне и при максимальных возможных глубинах русловых деформаций, когда над ним не будет слоя грунта [1].

Рассмотрим устойчивость подводного трубопровода на всплытие, проложенного прямолинейно по дну реки без изгиба в вертикальной плоскости. При этом на трубопровод будут действовать только вертикальные силы, направленные сверху вниз: вес трубопровода с изоляцией и футеровкой $G_ф$, вес балласта $G_б$ и продукта в трубопроводе $G_{пр}$, снизу вверх – выталкивающая архимедова сила $P_а$ и вертикальная подъемная сила $P_в$.

Степень устойчивости подводного трубопровода на всплытие определяется коэффициентом запаса $K_в$, показывающим во сколько раз следовало бы увеличить выталкивающую силу, чтобы привести трубопровод в состоя-

ние предельного равновесия. В соответствие с этим условие устойчивости трубопровода на всплытие можно записать в виде:

$$K_в = \frac{G_ф + G_б + G_{пр}}{P_а + P_в}. \qquad (1.8)$$

Коэффициент запаса устойчивости на всплытие $K_в$ зависит от характера пересекаемой водной преграды и изменяется в пределах от 1,07 до 1,25 [1]. Для трубопроводов, прокладываемых через реки выше предельного профиля размыва русла и через горные реки $K_в$=1,2 [1].

Из равенства (1.8) следует, что подводный трубопровод будет устойчив на всплытие, если $K_в$>1. В этом случае трубопровод будет иметь так называемую отрицательную плавучесть. Для нефте- и продуктопроводов необходимая отрицательная плавучесть обеспечивается, как правило, весом продукта и труб, а для газопроводов – весом труб и искусственно создаваемой пригрузки в виде балласта (железобетонные или чугунные грузы, сплошное бетонирование). При этом, так как выталкивающая сила воды увеличивается пропорционально квадрату диаметра трубопровода, а вес его – пропорционально диаметру в первой степени, то с увеличением диаметра трубопровода вес балласта резко возрастает и для газопроводов больших диаметров может в несколько раз превосходить вес самой трубы.

В качестве примера в табл. 2 приводятся расчетные значения основных сил, действующих на пустые стальные трубопроводы различного диаметра и толщины стенок, уложенных без изоляции и футеровки на дно водной преграды.

Таблица 2

Расчетные нагрузки, действующие на 1 пог. м газопровода, уложенного на дно водотока

Условный проход трубы D, мм	Наружный диаметр трубы $D_н$, мм	Толщина стенки трубы δ, мм	Вес 1 м пустой трубы $G_{тр}$, кН/м	Сила Архимеда $P_а$, кН/м	Подъемная сила $P_в$, кН/м	Требуемый вес балласта $G_б$, кН/м при $K_в$=1,2
300	325	8 9 10	0,613 0,688 0,760	0,813	0,325	0,765 0,677 0,608
400	426	9 10 11	0,801 0,888 0,974	1,39	0,426	1,38 1,30 1,22
500	529	10 11 12	1,26 1,38 1,50	2,16	0,529	1,96 1,84 1,72
600	630	10 11 12	1,51 1,65 1,79	3,06	0,629	2,92 2,78 2,63
700	720	10 12 14	1,72 2,06 2,39	3,99	0,720	3,93 3,60 3,27

800	820	10 12 14	1,96 2,34 2,73	5,18	0,820	5,24 4,86 4,46
1000	1020	10 12 14	2,44 2,92 3,40	8,01	1,02	8,39 7,91 7,43
1400	1420	12 13 14	4,08 4,41 4,76	15,5	1,42	16,3 15,9 15,6

При этом вес балласта $G_б$ определялся из формулы (1.8) при $K_в$=1,2 и $G_{пр}$=0, а при вычислении вертикальной подъемной сил $P_в$ придонная скорость обтекания трубы потоком воды принималась постоянной равной v=2 м/с, а коэффициент подъемной силы в формуле (1.7) C_y=0,5.

Как видно из табл. 2 для создания отрицательной плавучести трубопровода с коэффициентом запаса устойчивости на всплытие $K_в$=1,2 необходим достаточно большой вес балласта, превосходящий вес самого трубопровода. Это усложняет производство работ, увеличивает стоимость, снижает надежность работы и создает дополнительные трудности при протаскивании трубопровода через водную преграду.

Для защиты трубопроводов, прокладываемых через водные преграды по дну водотока без заглубления, рекомендуется использовать ПБЗГУ. Это дает возможность защитить оголенные и недостаточно заглубленные участки подводных трубопроводов от механических повреждений, предотвратить размыв грунта под трубопроводом и осуществить пригрузку подводных трубопроводов, обладающих положительной плавучестью. Трубопровод под водой при этом занимает положение согласно схемам, показанным на Рис. 4 Приложения. Такая защита из ПБЗГУ воспринимает на себя динамические нагрузки речного потока и далее защищает трубопровод, проложенный по дну без дополнительного сооружения траншеи.

Расчетный коэффициент запаса устойчивости всего сооружения на всплытие в этом случае может быть определен по формуле:

$$K_в = \frac{G_{тр} + G_з}{P_а + \rho_в g V_б}, \qquad (1.9)$$

где $G_з$ - вес ПБЗГУ шириной 1 м; $V_б$ - объем бетона в ПБЗГУ шириной 1 м.

Результаты расчетов по формуле (1.9) устойчивости на всплытие трубопроводов различных диаметров, защищенных ПБЗГУ, приведены в табл. 3.

При расчетах учитывалось, что согласно Рис. 4 защита выполнена из двух полотен ПБЗГУ, а габаритная ширина полотна составляет 1226 мм. При этом с учетом массы и объема бетона ПБЗГУ различных моделей [3] коэффициент запаса находится по формулам:

для ПБЗГУ модели №1

$$K_в = \frac{G_{тр} + 19{,}52}{P_а + 8{,}36}\ ; \qquad (1.10)$$

для ПБЗГУ модели №2

$$K_в = \frac{G_{тр} + 6{,}16}{P_а + 2{,}69}\ ; \qquad (1.11)$$

для ПБЗГУ модели №4

$$K_в = \frac{G_{тр} + 12{,}69}{P_а + 5{,}47}\ . \qquad (1.12)$$

Таблица 3

Расчетные нагрузки и коэффициент запаса устойчивости на всплытие газопровода, защищенного ПБЗГУ

Условный проход трубы D, мм	Наружный диаметр трубы $D_н$, мм	Толщина стенки трубы δ, мм	Вес 1 м пустой трубы $G_{тр}$, кН/м	Сила Архимеда $P_а$, кН/м	Коэффициент запаса $K_в$ с ПБЗГУ		
					модель №1	модель №2	модель №4
300	325	8	0,613	0,813	2,19	1,93	2,12
		9	0,688		2,20	1,96	2,13
		10	0,760		2,21	1,98	2,14
400	426	9	0,801	1,39	2,08	1,70	1,96
		10	0,888		2,09	1,72	1,98
		11	0,974		2,10	1,75	1,99
500	529	10	1,26	2,16	1,98	1,53	1,83
		11	1,38		1,99	1,56	1,84
		12	1,50		2,00	1,58	1,86
600	630	10	1,51	3,06	1,84	1,33	1,66
		11	1,65		1,85	1,36	1,68
		12	1,79		1,87	1,38	1,70
700	720	10	1,72	3,99	1,72	1,18	1,52
		12	2,06		1,75	1,23	1,56
		14	2,39		1,77	1,28	1,59
800	820	10	1,96	5,18	1,59	1,03	1,38
		12	2,34		1,62	1,08	1,41
		14	2,73		1,64	1,13	1,45
1000	1020	10	2,44	8,01	1,34	0,804	1,12
		12	2,92		1,37	0,850	1,16
		14	3,40		1,40	0,890	1,19
1200	1220	12	3,51	11,46	1,16	0,680	0,96
		13	3,80		1,18	0,704	0,97
		14	4,08		1,19	0,720	0,99
1400	1420	12	4,08	15,5	0,990	0,56	0,80
		13	4,41		1,002	0,58	0,82
		14	4,76		1,020	0,60	0,83

Как видно из таблицы ПБЗГУ модели №1 обеспечивает необходимый коэффициент запаса устойчивости трубопроводов на всплытие диаметром до 1200

мм включительно, модели №4 – до 1000 мм, а модели №2 – до 700 мм без применения дополнительной пригрузки в виде балласта.

1.2. Расчет устойчивости трубопровода на сдвиг

Устойчивость трубопровода, уложенного по дну водотока, на сдвиг обеспечивается соотношением горизонтальной силы гидродинамического давления воды $P_г$, определяемой по формуле (1.6), и силы трения трубопровода о грунт T. Сила трения трубопровода о грунт равна произведению коэффициента трения трубы о грунт $f_т$ на силу нормального давления N. Для прямолинейного трубопровода, уложенного на дно водотока, сила нормального давления N будет определяться весом трубопровода $G_ф$, включая изоляцию и футеровку, весом заполняющего трубу продукта $G_{пр}$, архимедовой выталкивающей силой $P_а$, подъемной силой $P_в$ и весом балласта $G_б$:

$$N = G_ф + G_{пр} - P_а - P_в + G_б\,. \qquad (1.13)$$

Условие устойчивости трубопровода на сдвиг в этом случае записывают в виде [2]:

$$P_г K_с = f_т\left(G_ф + G_{пр} - P_а - P_в + G_б\right), \qquad (1.14)$$

где $K_с$ – коэффициент запаса устойчивости на сдвиг, $K_с$=1,1÷1,15.

Коэффициент трения трубопровода о грунт $f_т$ принимается для мелкозернистых грунтов равным $tg\,\varphi$. Здесь φ - угол внутреннего трения грунта. Для песчаного грунта мелкой и средней крупности $\varphi \approx 30^\circ$ и $f_т \approx 0{,}6$ [2].

Результаты расчета по формуле (1.6) горизонтальной силы гидродинамического давления воды, действующей на незащищенный трубопровод, при различных значениях наружного диаметра трубопровода $D_н$ и скорости обтекания его потоком воды v приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетное значение горизонтальной силы гидродинамического давления воды на 1 м незащищенного трубопровода ($P_г$; кН/м)

$D_н$, мм / v, м/с	325	426	529	630	720	820	1020	1220	1420
0,5	0,045	0,058	0,073	0,087	0,099	0,113	0,140	0,168	0,195
1,0	0,178	0,234	0,291	0,346	0,396	0,451	0,559	0,667	0,782
1,5	0,402	0,528	0,655	0,780	0,892	1,02	1,26	1,51	1,76
2,0	0,715	0,938	1,17	1,38	1,59	1,81	2,25	2,69	3,13
2,5	1,12	1,46	1,81	2,17	2,47	2,83	3,51	4,20	4,81
3,0	1,61	2,11	2,62	3,12	3,57	4,06	5,05	6,04	7,03
3,5	2,19	2,87	3,57	4,25	4,86	5,52	6,88	8,22	9,57
4,0	2,86	3,75	4,66	5,54	6,34	7,22	8,98	10,7	12,5

При расчетах коэффициент лобового сопротивления принят, согласно [2], C_x=1,1.

Как видно из таблицы горизонтальная составляющая силы гидродинамического давления воды на незащищенный трубопровод составляет значительную величину, увеличиваясь с увеличением диаметра трубопровода в первой степени и с увеличением скорости движения воды в квадрате. Так, например, при увеличении наружного диаметра трубопровода от 1220 до 1420 мм и скорости течения воды от 2 до 3 м/с горизонтальная сила, приходящаяся на 1 м длины трубопровода увеличивается от 2,25 до 7,03 кН.

Для обеспечения устойчивости трубопровода на сдвиг в этом случае потребуется дополнительная пригрузка его в виде балласта, представляющего собой отдельные чугунные или железобетонные грузы. Необходимый вес балласта при этом может быть определен из формулы (1.14). Для незащищенного пустого трубопровода необходимый вес балласта в воде:

$$G_б = \frac{P_г K_с}{f_т} + P_а + P_в - G_{тр}\,. \qquad (1.15)$$

В качестве примера в табл. 5 приводятся расчетные значения необходимого веса балласта в воде для пригрузки подводного газопровода при скорости течения воды v=2 м/с и коэффициенте запаса устойчивости на сдвиг $K_с$=1,15.

Таблица 5

Расчетные нагрузки, действующие на 1 пог. м незащищенного трубопровода, уложенного на дно водотока, при скорости течения v=2 м/с и необходимый вес балласта

Наружный диаметр трубы $D_н$, мм	Толщина стенки трубы δ, мм	Горизонтальная сила $P_г$, кН/м	Вес 1 м пустой трубы $G_{тр}$, кН/м	Сила Архимеда $P_а$, кН/м	Подъемная сила $P_в$, кН/м	Требуемый вес балласта $G_б$, кН/м
325	10	0,715	0,760	0,813	0,325	1,75
426	10	0,938	0,888	1,39	0,426	2,74
529	10	1,17	1,26	2,16	0,529	3,67
630	10	1,38	1,51	3,06	0,629	4,84
720	10	1,59	1,72	3,99	0,720	6,04
820	10	1,81	1,96	5,18	0,820	7,49
1020	10	2,25	2,44	8,01	1,02	10,9
1220	12	2,69	3,51	11,5	1,22	14,3
1420	12	3,13	4,08	15,5	1,42	18,9

Как видно из таблицы для обеспечения необходимой устойчивости газопровода на сдвиг требуется значительный вес балласта, в несколько раз превышающий вес самой трубы. Из сравнения табл. 5 и 2 также видно, что необходимый вес балласта для обеспечения устойчивости трубопровода на сдвиг превышает вес балласта для обеспечения устойчивости на всплытие.

Устойчивость на сдвиг подводного трубопровода, защищенного ПБЗГУ по схеме, показанной на Рис. 4 приложения, обеспечивается автоматически, так как горизонтальное усилие потока воспринимает на себя защита из ПБЗГУ.

В этом случае горизонтальная сила гидродинамического давления воды на защиту из ПБЗГУ может быть определена как сумма трех составляющих:

$$P_г = P_1 + P_2 + P_{тр}, \qquad (1.16)$$

где P_1 - сила, обусловленная гидродинамическим давлением потока воды на передний торец бетонного блока; P_2 - горизонтальная сила, обусловленная плавным обтеканием защиты потоком воды; $P_{тр}$ - сила трения, обусловленная трением частиц жидкости о поверхность защиты.

Силы P_1 и P_2 могут быть определены по формуле (1.6). Тогда учитывая, что высота переднего торца бетонного блока ПБЗГУ модели №1 h=240 мм и принимая коэффициент лобового сопротивления для скошенного торца согласно [5] C_x=1,5, получим:

$$P_1 = 1{,}5 \cdot 0{,}24 \cdot 1000\frac{v^2}{2} = 180v^2, \left[\frac{Н}{м}\right].$$

Коэффициент сопротивления плавно обтекаемого профиля согласно [5] равен 0,06÷0,08, тогда, учитывая, что площадь миделевого сечения 1 м защиты из ПБЗГУ приближенно можно определить как $S = D_н \cdot 1$, получим:

$$P_2 = 0{,}08D_н \cdot 1000\frac{v^2}{2} = 40D_н v^2, \left[\frac{Н}{м}\right].$$

Силу сопротивления трения можно определить по формуле [6]:

$$P_{тр} = C_f S\rho\frac{v^2}{2}, \qquad (1.17)$$

где C_f - коэффициент сопротивления трения, зависящий от шероховатости обтекаемой поверхности и числа Рейнольдса; S - площадь трения, равная для рассматриваемого случая, габаритной площади двух плит ПБЗГУ единичной ширины:

$$S = 2 \cdot 1 \cdot 2{,}75 = 5{,}5\ м^2.$$

Величину C_f можно найти для турбулентного пограничного слоя по формуле [6]:

$$C_f = 0{,}03\left(\frac{\Delta}{L} + \frac{83}{Re}\right)^{0{,}2}, \qquad (1.18)$$

где Δ - абсолютная шероховатость обтекаемой поверхности (для бетонных поверхностей Δ≈1 мм); L - длина обтекаемой поверхности (L ≈5,5 м); Re - число Рейнольдса, $Re = vL/\vartheta$; ϑ - кинематическая вязкость воды, при температуре 20 °С, ϑ=10^{-6} $м^2/с$.

Результаты расчета коэффициента C_f при различных скоростях потока приведены в табл. 6

Таблица 6

Значения коэффициента сопротивления трения C_f
в зависимости от скорости течения воды

v, м/с	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$Re \cdot 10^{-6}$	2,75	5,5	8,25	11,0	13,75	16,5	19,25	22,0
C_f	0,0055	0,0054	0,0054	0,0054	0,0053	0,0053	0,0053	0,0053

Как видно из таблицы коэффициент C_f мало изменяется в зависимости от изменения скорости течения воды и может быть принят постоянным и равным 0,0053. Тогда сила сопротивления трения:

$$P_{тр} = 0{,}0053 \cdot 5{,}5 \cdot 1000 \frac{v^2}{2} = 14{,}6v^2, \left[\frac{Н}{м}\right],$$

а общая горизонтальная сила гидродинамического давления воды на защиту из ПБЗГУ составляет:

$$P_г = 180v^2 + 40D_н v^2 + 14{,}6v^2 = (194{,}6 + 40D_н)v^2, \left[\frac{Н}{м}\right].$$

Результаты расчета этой силы при различных значениях наружного диаметра трубопровода и скорости течения воды приведены в табл. 7.

Таблица 7

Расчетные значения горизонтальной силы гидродинамического давления воды на 1 м трубопровода, защищенного ПБЗГУ модели №1 ($P_г$; кН/м)

$D_н$, мм / v, м/с	325	426	529	630	720	820	1020	1220	1420
0,5	0,052	0,053	0,054	0,055	0,056	0,057	0,059	0,061	0,063
1,0	0,208	0,212	0,216	0,220	0,223	0,227	0,235	0,243	0,252
1,5	0,468	0,477	0,486	0,495	0,502	0,511	0,529	0,547	0,567
2,0	0,832	0,848	0,864	0,880	0,892	0,908	0,940	0,972	1,01
2,5	1,30	1,33	1,35	1,38	1,39	1,42	1,47	1,52	1,58
3,0	1,87	1,91	1,94	1,98	2,01	2,04	2,12	2,19	2,27
3,5	2,55	2,60	2,65	2,69	2,73	2,78	2,88	2,98	3,09
4,0	3,33	3,39	3,46	3,52	3,57	3,63	3,76	3,89	4,03

Из сравнения табл. 4 и 7 видно, что при больших диаметрах трубопровода защита из ПБЗГУ значительно снижает силу гидродинамического давления воды на трубопровод. Так для трубопровода с наружным диаметром 1420 мм эта сила снижается примерно в три раза по сравнению с незащищенным трубопроводом.

Условие устойчивости трубопровода, защищенного ПБЗГУ на сдвиг по аналогии с формулой (1.15), может быть записано в виде:

$$P_г K_с = f_т (G_т + G_з - P_а), \qquad (1.19)$$

где $G_з$ - вес защиты из ПБЗГУ в воде.

Результаты расчетов коэффициента запаса устойчивости на сдвиг трубопроводов разных диаметров, защищенных ПБЗГУ модели №1, приведен в табл. 8.

Таблица 8

Коэффициент запаса устойчивости на сдвиг газопровода, защищенного ПБЗГУ

$D_н$, мм / v, м/с	325	426	529	630	720	820	1020	1220	1420
0,5	128	121	114	105	95,2	83,6	54,8	31,2	4,00
1,0	32	30,2	28,5	26,2	23,9	21,0	13,8	7,83	1,00
1,5	14,2	13,4	12,7	11,6	10,6	9,32	6,11	3,48	0,44
2,0	8,01	7,54	7,13	6,54	5,98	5,25	3,44	1,96	0,25
2,5	5,13	4,81	4,56	4,17	3,84	3,35	2,20	1,25	0,16
3,0	3,56	3,35	3,17	2,91	2,65	2,33	1,52	0,868	0,11
3,5	2,61	2,46	2,32	2,14	1,95	1,71	1,12	0,638	0,08
4,0	2,00	1,89	1,78	1,64	1,49	1,31	0,86	0,489	0,06

При расчетах учитывалось, что вес в воде двух плит ПБЗГУ модели №1 единичной ширины составляет:

$$G_з = 19{,}52 - 8{,}36 = 11{,}16 \left[\frac{кН}{м}\right],$$

а коэффициент трения принимался равным $f_т$=0,6. При этом коэффициент запаса устойчивости на сдвиг определялся выражением:

$$K_с = 0{,}6\frac{(G_{тр} - P_а + 11{,}16)}{P_г}. \qquad (1{,}20)$$

Как видно из таблицы устойчивость на сдвиг газопровода, защищенного ПБЗГУ модели №1, обеспечивается с достаточным запасом без дополнительной его пригрузки при диаметрах труб до 1000 мм и скоростях потока воды до 4 м/с. Только для трубопроводов больших диаметров ($D \geq$1200 мм) и больших скоростях потока воды ($v >$2,5 м/с) требуется дополнительная пригрузка балластом. Но и в этом случае вес необходимого балласта оказывается значительно меньше, чем для незащищенного трубопровода. Так, например, для трубопровода наружным диаметром $D_н$=1420 мм при скорости обтекания его потоком воды v=2 м/с и коэффициенте запаса устойчивости на сдвиг $K_с$=1,15 вес необходимого балласта составит:

$$G_б = \frac{P_г K_с}{f_т} + P_а - G_{тр} - 11{,}16 = \frac{1{,}01 \cdot 1{,}15}{0{,}6} + 15{,}5 - 4{,}76 - 11{,}16 = 1{,}52 \left[\frac{кН}{м}\right]$$

При этом для незащищенного трубопровода необходимый вес балласта, как видно из табл. 5, составляет 18,9 кН/м.

1.3 Оценка снижения вибрационных нагрузок на трубопровод,

защищенный ПБЗГУ

Известно, что при воздействии на подводный трубопровод потока воды со значительными скоростями течения возможны вибрации трубопровода, которые могут привести к его разрыву [1]. Это обусловлено тем, что при обтекании потоком воды цилиндрического тела за ним образуются чередующиеся вихри. Частота срыва этих вихрей зависит от диаметра цилиндра и скорости потока. При этом на трубопровод воздействуют переменные силы в направлении, перпендикулярном направлению потока. При совпадении частоты действия этих сил с периодом резонансных колебаний самого трубопровода возникают чрезмерные вибрации, которые являются наиболее частой причиной повреждения трубопровода [1].

Частота срыва вихрей n для цилиндров с заданным диаметром $D_н$ и скоростью потока v может быть определена по параметру Струхаля $Sh = nD_н/v$ в зависимости от числа Рейнольдса $Re = vD_н/\vartheta$.По данным [1] в диапазоне чисел Re=$10^3 \div 10^5$ параметр Струхаля остается примерно постоянным и равным: Sh=0,2. При этом частота срыва вихрей составляет: $n = 0{,}2\,v/D_н$.

Рассматривая колебания провисающих участков подводных трубопроводов по схеме вынужденных колебаний, дифференциальное уравнение без учета продольного усилия в трубопроводе записывают в виде [2]:

$$EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \beta\frac{\partial y}{\partial t} + Ky = q_0 \sin\omega t\,, \qquad (1.21)$$

где y - поперечное смещение трубы; E - модуль упругости материала трубы (для стали E=2,07×10^8 кПа); I - момент инерции сечения трубы; m - масса единицы длины трубы с учетом «присоединенной» массы воды m'; $\beta = 0{,}3D_н$ - коэффициент сопротивления колебаниям ($D_н$ в [см]); K - коэффициент постели грунта; q_0 - интенсивность внешней силы; ω - круговая частота внешней силы.

При расчете подводного трубопровода на динамические воздействия необходимо знать его собственную частоту и амплитуды колебаний. Влияние демпфирующего и инерционного воздействия окружающей трубопровод воды учитывается, так называемой, «присоединенной» массой жидкости [2]. Как показывают опыты, «присоединенная» масса уменьшает частоту колебаний конструкции и зависит от положения, занимаемого трубопроводом относительно дна русла и свободной поверхности. По данным [2] «присоединенная» масса составляет 1,2÷1,6 массы вытесненной трубопроводом воды. При этом массу единицы длины трубы с учетом «присоединенной» массы воды можно представить в виде:

$$m = \frac{G_{тр}}{g} + 1{,}4\rho_в\frac{\pi D_н^2}{4}\,. \qquad (1.22)$$

Численное значение переменной поперечной силы определяется из выражения:

$$q_0 = C_к D_н \frac{\rho v^2}{2}, \qquad (1.23)$$

где коэффициент $C_к$ зависит от частоты срыва вихрей n и в среднем: $C_к \approx 0{,}2$, [2].

Круговая частота внешней силы:

$$\omega = \frac{2\pi v Sh}{D_н}. \qquad (1.24)$$

Предполагается, что колебания трубопровода происходят в упругой среде, характеризуемой коэффициентом постели:

$$K = K_0 D_н, \qquad (1.25)$$

где K_0 - коэффициент постели при сжатии грунта. Для песчаного грунта K_0=1÷1,5 Н/м^3, [2]. Если трубопровод на грунт не опирается K=0.

Учитывая только вынужденные колебания решение дифференциального уравнения (1.21) можно записать в виде:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} a_{0n} x_n \sin(\omega t - \varphi_n), \qquad (1.26)$$

где коэффициенты a_n, x_n и φ_n определяются из граничных условий, которые определяются характером заделки в грунт концов свободного участка трубопровода. Например, пусть в колебательном движении находится размытый участок трубопровода длинной l. Если считать что концы его защемлены, то при:

$$x = 0 \text{ и } x = l \;\; y(x) = 0 \text{ и } y'(x) = 0. \qquad (1.27)$$

Колебания размытых участков трубопроводов происходят обычно в первом тоне [2], поэтому решение (1.26) для первой формы колебаний принимает вид:

$$y = a_0 x_1 \sin(\omega t - \varphi_1). \qquad (1.28)$$

Здесь φ_1 - фаза колебаний, определяемая выражением:

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\beta\omega}{m\left(\omega_{01}^2 - \omega^2 + K/m\right)}, \qquad (1.29)$$

где ω_{01} - собственная частота колебаний трубопровода:

$$\omega_{01} = \frac{\lambda_{01}^2}{l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}}. \qquad (1.30)$$

В соответствии с граничными условиями (1.27) λ_{01}=4,73. Коэффициент x_1 определяется из выражения:

$$x_1 = C_1' \sin\lambda_{01}\frac{x}{l} + C_2' \cos\lambda_{01}\frac{x}{l} + C_3' \operatorname{sh}\lambda_{01}\frac{x}{l} + C_4' \operatorname{ch}\lambda_{01}\frac{x}{l}, \qquad (1.31)$$

где C_1'=1; C_2'= -1,0178; C_3'= -1; C_4'= -1,0178.

Коэффициент a_{01} находится по формуле:

$$a_{01} = \frac{\alpha_1}{\sqrt{\left(\omega_{01}^2 - \omega^2 + K/m\right)^2 + \left(\beta\omega/m\right)^2}}, \qquad (1.32)$$

где при граничных условиях (1.27) α_1=0,815q_0/m.

Наибольшую амплитуду колебаний y_{max} определяют как произведение a_{01} на x_1, при x=0,5l:

$$y_{max} = a_{01}x_1 . \qquad (1.33)$$

В качестве примера в табл. 9 приводятся параметры колебаний незащищенных трубопроводов, рассчитанные по формулам (1.22) – (1.32). При расчетах принято: длина незащищенного участка трубопроводов l=40 м; толщина стенки труб δ=10 мм; скорость потока, действующего на трубопровод, v=1 м/с.

Результаты вычислений показывают, что при заданной длине незащищенного участка трубопроводов и скорости потока, колебания трубопровода диаметром 250 мм находятся вблизи условия резонанса, когда частота собственных колебаний трубопровода ω_{01} совпадает с частотой возмущающей силы ω. При этом наблюдается резкое повышение амплитуды колебаний, значительное увеличение изгибающего момента и напряжений в трубопроводе, которые могут явиться основной причиной его разрушения.

Таблица 9

Расчетные значения параметров колебаний незащищенных трубопроводов под действием гидродинамической силы

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина					
Условный проход трубы	D	мм	150	200	250	300	400	500
Наружный диаметр трубы	$D_н$	мм	168	219	273	325	426	529
Толщина стенки трубы	δ	мм	10	10	10	10	10	10
Момент инерции сечения трубы	I	см^4	1554	3590	7149	12270	28243	54659
Масса 1 м трубы	m	кг/м	39,0	51,5	64,8	77,5	102,6	152,9
«Присоединенная» масса воды	m'	кг/м	31,0	52,7	82,0	116,1	198,4	307,1
Интенсивность внешней силы	q_0	Н/м	16,8	21,9	27,3	32,5	42,6	52,9
Коэффициент сопротивления колебаниям	β	Н·с/м^2	5,04	6,57	8,19	9,75	12,8	15,9

Круговая частота внешней силы	ω	c^{-1}	7,48	5,73	4,60	3,86	2,95	2,73
Собственная частота колебаний трубопровода	ω_{01}	c^{-1}	3,00	3,74	4,44	5,07	6,17	6,94
Амплитуда колебаний	y_{max}	см	0,76	1,65	18,9	2,30	0,71	0,42

Критическая длина незащищенного участка подводного трубопровода, при которой наблюдается явление резонансных колебаний, может быть определена путем приравнивания формул (1.24) и (1.30). Тогда получим:

$$l_{кр} = \lambda_{01}\sqrt{\frac{D_н}{2\pi v Sh}\sqrt{\frac{EI}{m}}}. \qquad (1.34)$$

Результаты расчетов по этой формуле критической длины стальных трубопроводов E=2,07×10^8 кПа при λ_{01}=4,73, числе Струхаля Sh=0,2 и толщине стенки трубы δ=10 мм приведены в табл. 10.

Как видно из таблицы критическая длина трубопровода существенно зависит от его диаметра и скорости потока. Для трубопроводов больших диаметров и небольшой скорости потока (v ≤1 м/с) резонансные явления могут наблюдаться только при большой длине незащищенного участка $l_{кр}$ >100 м. Наиболее вероятны резонансные явления для трубопроводов небольших диаметров при большой скорости потока v ≥3 м/с, так как при этом критическая длина составляет всего 15÷20 м.

Таблица 10

Расчетные значения критической длины
участка незащищенного трубопровода, при которой может возникнуть
явление резонанса, ($l_{кр}$, м)

D, мм / v, м/с	150	200	250	300	400	500	600	700	1000
0,5	35,8	45,7	55,4	64,7	81,7	96,7	113	126	167
1,0	25,3	32,3	39,2	45,7	57,8	68,4	80,2	89,4	118
1,5	20,6	26,3	32,0	37,4	47,2	55,8	65,5	73,0	96,3
2,0	17,9	22,8	27,7	32,4	40,9	48,4	56,7	63,2	83,4
2,5	16,0	20,4	24,8	29,0	36,6	43,3	50,7	56,6	74,6
3,0	14,6	18,6	22,6	26,4	33,4	39,5	46,3	51,6	68,1
3,5	13,5	17,3	20,9	24,5	30,9	36,6	42,9	47,8	63,1
4,0	12,6	16,2	19,6	22,9	28,9	34,2	40,1	44,7	59,0

Для подводного трубопровода, защищенного ПБЗГУ по схеме, показанной на Рис. 4 приложения, резонансных явлений не возникает и вибраци-

онные нагрузки на трубопровод значительно снижаются. Это обусловлено двумя факторами:

1) Значительным снижением знакопеременной поперечной силы, возбуждающей колебательный процесс трубопровода, что связано с плавностью обтекания потоком сооружения, защищенного ПБЗГУ, и отсутствием чередующихся вихрей за ним. В этом случае незначительная пульсационная нагрузка на защиту из ПБЗГУ может возникнуть в результате пульсаций скоростей и давлений, обусловленных турбулентностью потока воды. Как показывают опыты [7] частотный спектр турбулентных пульсаций в реках и каналах весьма широк и простирается на три - четыре порядка и более. Наиболее энергоемкими являются низкочастотные пульсации, принадлежащие крупномасштабным вихрям с масштабом $D_н$; их частота может быть определена отношением [7]:

$$\omega_в = \frac{v}{0{,}1D_н}. \qquad (1.35)$$

Численное значение переменной поперечной силы при этом также можно определить по формуле (1.23), принимая для плавно обтекаемого профиля коэффициент сопротивления $C_к$=0,06÷0,08 [5].

2) Уменьшением собственной частоты колебаний трубопровода, защищенного ПБЗГУ, за счет увеличения массы сооружения и «присоединенной» массы воды. Амплитуда колебаний при этом также значительно уменьшается за счет увеличения массы сооружения и влияния коэффициента постели K (в этом случае K≠0, так как защита из ПБЗГУ опирается на грунт). В качестве примера в табл. 11 приводятся расчетные значения параметров колебаний трубопроводов, защищенных ПБЗГУ модели №1 по схеме, показанной на Рис. 4 приложения. При расчетах также принято: длина незащищенного участка трубопроводов l=40 м; толщина стенки труб δ=10 мм; скорость потока воды v=1 м/с; $C_к$=0,06.

Таблица 11

Расчетные значения параметров колебаний трубопроводов, защищенных ПБЗГУ модели №1

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина					
Условный проход трубы	D	мм	150	200	250	300	400	500
Наружный диаметр трубы	$D_н$	мм	168	219	273	325	426	529
Масса 1 м сооружения	$m_с$	кг/м	2029	2041	2055	2068	2093	2143
«Присоединенная» масса воды	m'	кг/м	1223	1245	1274	1308	1390	1499
Общая масса	m	кг/м	3252	3286	3329	3376	3483	3642
Интенсивность внешней силы	q_0	Н/м	5,04	6,57	8,19	9,75	12,78	15,87

Круговая частота внешней силы	$\omega_в$	$с^{-1}$	59,5	45,6	36,6	30,8	23,5	18,9
Собственная частота колебаний трубопровода	ω_{01}	$с^{-1}$	0,440	0,666	0,933	1,21	1,81	2,47
Амплитуда колебаний	y_{max}	$см \times 10^{-6}$	0,64	1,40	2,72	4,52	9,91	18,4

Как видно из таблицы расчетные значения круговой частоты колебаний внешней силы более чем на порядок превосходят значения собственной частоты колебаний трубопровода. Это исключает возможность появления резонансных колебаний трубопроводов, защищенных ПБЗГУ. Из сравнения табл. 9 и 11 также видно, что защита из ПБЗГУ значительно снижает максимальную амплитуду колебаний, которая для трубопроводов, защищенных ПБЗГУ, составляет всего сотые доли мм.

Таким образом, расчеты показывают, что защита из ПБЗГУ является достаточно эффективным средством предотвращения колебаний подводных трубопроводов под динамическим воздействием потока.

2. Использование ПБЗГУ

для защиты подводного трубопровода от повреждений

2.1 Защита от повреждений и деформаций самой трубы

Причины повреждения подводных трубопроводов связаны с особенностями их работы в водной среде. Анализ причин повреждения подводных трубопроводов показывает[1], что основная причина аварий подводных трубопроводов на речных переходах – разрыв труб при их вибрациях, механических повреждениях и повреждениях льдом.

Как показано в разделе 1.3 защита из ПБЗГУ значительно снижает величину знакопеременной поперечной силы, возбуждающей колебательный процесс трубопровода, уменьшает собственную частоты и амплитуду колебаний трубопровода, а также исключает возможность появления резонансных явлений при колебаниях. Это повышает надежность работы подводного перехода при вибрациях. Поэтому рассмотрим эффективность использования ПБЗГУ для защиты подводного трубопровода от ударного воздействия внешних предметов.

Течение реки часто несет внешние предметы (коряги, бревна, валуны), которые могут ударно воздействовать на незащищенный подводный трубопровод и привести к его деформации и разрушению. Скорость осаждения таких предметов в воде (гидравлическая крупность) определяется известной формулой [6]:

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d_э}{C_д} \frac{(\rho_т - \rho_в)}{\rho_в}}, \qquad (2.1)$$

где $\rho_т$ - плотность осаждающегося в воде тела, кг/м^3; $d_э$ - эквивалентный диаметр тела, м; $C_д$ - коэффициент сопротивления давления, для шарообразного тела $C_д \approx 0{,}44$, [6].

По этой же формуле можно определить и скорость перемещения тела под действием потока воды, если величину скорости U принять равной местной скорости потока воды на глубине расположения трубопровода. При этом скорости в различных точках речного потока изменяются как по глубине H, так и в плане. Типичное изменение скорости потока по глубине представлено на Рис. 4 приложения. Как видно из рисунка величина придонной скорости потока составляет 0,7 средней скорости, то есть U=0,7v.

Задаваясь различной плотностью $\rho_т$ по формуле (2.1) можно определить максимальный эквивалентный диаметр переносимого водой тела при данной скорости потока.

Величину необходимой силы удара $F'_{уд}$, приводящей к разрушению при столкновении тела с незащищенным участком подводной трубы, найдем учи-

тывая, что кинетическая энергия тела переходит в работу деформации стенок трубы:

$$M\frac{U^2}{2} = \frac{1}{2}F'_{уд}\Delta r\,, \qquad (2.2)$$

где $M = \rho_т \pi d_э^3/6$ - масса тела, кг; Δr - радиальная деформация стенки трубы.

По закону Гука:

$$\frac{\Delta r}{r_0}E = \sigma\,, \qquad (2.3)$$

где E - модуль упругости материала стенок трубы; σ - нормальное напряжение; r_0 - радиус трубы.

Принимая для стали E=2,07×10^8 кПа и определяя расчетное напряжение как [1]:

$$\sigma = K_1 m_1 m_2 \sigma_{вр}\,, \qquad (2.4)$$

где K_1 - коэффициент однородности при разрыве стали (K_1=0,8÷0,85); m_1=0,8 - коэффициент условий работы материала труб; m_2=0,75 - коэффициент условий работы трубопровода; $\sigma_{вр}$ - временное напряжение разрыва ($\sigma_{вр}$ ≈5×10^5 кПа).

Из (2.2), (2.3) и (2.4) получим необходимую силу удара для разрушения и деформации трубопровода определенного диаметра.

Действительная сила удара тела $F''_{уд}$, обладающего определенной массой и движущегося с определенной скоростью, может быть определена из закона сохранения импульса:

$$MU = F''_{уд}\tau\,, \qquad (2.5)$$

где τ - время столкновения тела со стенкой трубы, определяемое по выражению:

$$\tau = 2l\sqrt{\frac{\rho_т}{E}}\,, \qquad (2.6)$$

где l - характерный линейный размер тела, например его эквивалентный диаметр.

Если $F''_{уд}$ оказывается больше $F'_{уд}$, то велика вероятность повреждения трубы при столкновении с телом.

В качестве примера рассмотрим возможность разрушения незащищенной подводной трубы металлическим предметом эквивалентным диаметром $d_э$=0,1 м.

При плотности тела $\rho_т$=7800 кг/м^3 его масса составит:

$$M = \frac{\rho_т \pi d_э^3}{6} = \frac{7800 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1^3}{6} = 4{,}1\ кг\,.$$

Скорость осаждения тела в воде согласно формуле (2.1):

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot 9{,}81 \cdot \frac{0{,}1}{0{,}44} \cdot \frac{(7800 - 1000)}{1000}} = 4{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Время упругого удара тела о стенку трубы согласно формуле (2.6) равно:

$$\tau = 2 \cdot 0{,}1 \sqrt{\frac{7800}{2{,}07 \times 10^{11}}} = 3{,}88 \times 10^{-5}\ \text{с}.$$

Сила удара тела о стенку трубы:

$$F''_{\text{уд}} = \frac{mU}{\tau} = \frac{4{,}1 \cdot 4{,}5}{3{,}88 \times 10^{-5}} = 4{,}75 \times 10^{5}\ \text{Н} = 475\ \text{кН}.$$

Разрушающее напряжение в стенке трубы:

$$\sigma = 0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}75 \cdot 5 \times 10^{5} = 2{,}4 \times 10^{5}\ \text{кПа}.$$

Предельная относительная деформация трубы:

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{\sigma}{E} = \frac{2{,}4 \times 10^{5}}{2{,}07 \times 10^{8}} = 1{,}16 \times 10^{-3}.$$

Согласно формуле (2.2) необходимая сила удара для разрушения или деформации стенки трубы равна:

$$F'_{\text{уд}} = \frac{2MU^2}{D} \frac{r_0}{\Delta r}.$$

Результаты расчетов для стальных трубопроводов различного диаметра при толщине стенки δ=10 мм приведены в табл. 12.

Таблица 12

Необходимая сила удара для разрушения или деформации стальной трубы

D, мм	150	200	250	300	400	500	800	1000
$F'_{\text{уд}}$, кН	954	716	572	477	358	286	179	143

Сравнение полученного значения разрушающей силы $F'_{\text{уд}}$ с действительной силой удара $F''_{\text{уд}}$ показывает, что рассматриваемое тело способно разрушить подводный трубопровод диаметром более 300 мм. Это указывает на то, что незащищенный подводный трубопровод может быть деформирован или разрушен различными предметами (лотами, якорями), а также телами, переносимыми потоком воды.

Как показано в работе [4], защита подводного трубопровода из ПБЗГУ, выполненная по схемам Рис. 4 или 6 приложения, надежно выдерживает многочисленные удары различных предметов, переносимых потоком воды, а также не может быть разрушена динамическим воздействием льда на защищаемое сооружение и надежно противостоит силе давления льда при образовании заторов. При этом процесс разрушения защиты из ПБЗГУ от удара посторонними предметами протекает различно, в зависимости от запаса энергии ударяемого предмета, его прочности, характера удара и других факторов. При столкновении внешнего предмета с защитой из ПБЗГУ может произойти

либо разрыв соединительного арматурного каната или разрушение бетонного блока.

В работе [4] было показано, что разрушение бетонного блока ПБЗГУ при столкновении с перемещающими потоком воды предметами может произойти путем его ударного раскалывания с образованием трещин. При этом раскалывающее ударное усилие F_z определяется по формуле [4]:

$$F_z = 2h_{max} b \sigma_{сж} \mathrm{tg}\frac{\alpha}{2}, \qquad (2.7)$$

где

$$h_{max} = \frac{\sigma_р}{\sigma_{сж}} \frac{a^2(1 + f\mathrm{ctg}\frac{\alpha}{2})}{b(1 - f\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2})}; \qquad (2.8)$$

$\sigma_{сж}$ и $\sigma_{сж}$ - предельно допустимые напряжения растяжения и сжатия бетона; a - общая высота бетонного блока; b - ширина вершины блока; f - коэффициент трения тела по бетону; α - острый угол ударяемого тела.

Рассматривая наиболее неблагоприятный случай, когда постороннее тело производит удар по бетонному блоку углом плоскости среза (α=90°), и принимая коэффициент f=0,6 и $\sigma_р$=2,5×10^3 кПа, $\sigma_{сж}$=2,8×10^4 кПа [8], при размерах бетонного блока a=0,24 м и b=0,19 м, получим:

$$h_{max} = \frac{2{,}5 \times 10^3}{2{,}8 \times 10^4} \frac{0{,}24^2}{0{,}19} \frac{(1 + 0{,}6)}{(1 - 0{,}6)} = 0{,}108 \text{ м};$$

$$F_z = 2 \cdot 0{,}108 \cdot 0{,}19 \cdot 2{,}8 \times 10^4 = 1150 \text{ кН}.$$

Потенциальная энергия деформации блока:

$$E_{пот} = \frac{1}{2} F_z h_{max} = \frac{1}{2} \cdot 1150 \cdot 0{,}108 = 62{,}1 \text{ кДж}.$$

Пренебрегая работой, затраченной на упругие деформации самого ударяемого тела и поворот его при внецентренном ударе, как незначительные и идущие в запас расчета, можно считать, что потенциальная энергия деформации блока равна изменению кинетической энергии ударяемого тела, то есть $E_{кин} = mU^2/2 = 62{,}1$ кДж. Отсюда видно, что не может существовать постороннего предмета, переносимого потоком воды, способного разрушить ПБЗГУ. Так если, например, принять скорость столкновения постороннего предмета с защитой из ПБЗГУ, равной 4 м/с, то для разрушения бетонного блока необходима масса этого предмета не менее:

$$M = \frac{2E_{кин}}{U^2} = \frac{2 \cdot 62{,}1 \times 10^3}{16} = 7760 \text{ кг}$$

что нереально, так как тела такого размера не могут перемещаться потоком воды.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что защищая подводный трубопровод от воздействия различных предметов, переносимых потоком воды, ПБЗГУ воспринимает эти воздействия на себя, повышая надежность всего подводного перехода.

2.2 Защита от повреждений изоляции и футеровки подводного трубопровода

Все подводные трубопроводы имеют антикоррозийные покрытия, наносимые на наружную поверхность трубы толщиной 9÷15 мм [1]. Наиболее часто при строительстве подводных переходов в качестве антикоррозийных покрытий применяют битумные мастики с различными наполнителями, эпоксидные смолы, битумно-песчаные смеси и прочие. Поскольку ремонт изоляционного покрытия под водой требует больших затрат и не всегда достаточно эффективен, а применяемые покрытия для подводных трубопроводов не являются достаточно прочными, поверхность изоляции защищают от механических повреждений футеровкой деревянными рейками или нанесением сплошного армированного покрытия. Деревянная футеровка требует значительное количество лесоматериалов, а также, обладая значительной положительной плавучестью, она уменьшает устойчивость трубопровода на дне водной преграды, что требует применения дополнительного балласта.

Футеровка трубопровода путем нанесения сплошного бетонного покрытия значительно повышает жесткость конструкции, что значительно усложняет процесс укладки трубопровода на дно водной преграды.

При эксплуатации подводного трубопровода повреждение антикоррозийной изоляции может происходить в результате механического воздействия различных предметов, переносимых потоком воды, истирания движущимися песчаными наносами, в результате трения вибрирующего трубопровода о грунт, а также в результате воздействия ледяного покрова.

Как уже было указано ПБЗГУ, защищая оголенные и недостаточно заглубленные участки трубопроводов, воспринимает ударное воздействие посторонних предметов на себя, предотвращая разрушение противокоррозийной изоляции и футеровки.

Значительно снижая частоту и амплитуду колебаний трубопровода, защита из ПБЗГУ предотвращает также истирание и разрушение противокоррозийной изоляции и футеровки от трения трубы о грунт.

Как показано в работе [4] ПБЗГУ является также эффективным средством защиты подводного перехода от размыва грунта. При этом поток воды обтекает защищенный участок подводного перехода достаточно плавно, без образования вихревых водоворотных зон. Как показали гидравлические расчеты [4] ПБЗГУ значительно снижает размывающую способность потока. Так, например, если незащищенный трубопровод, уложенный на песчаный грунт при глубине h=5 м начинает размываться при скорости потока v=1 м/с, то защищенный – при значительно большей скорости, имея меньшую протяженность и глубину воронки размыва. Вместе с тем, это снижает абразивное воздействие размываемого и переносимого потоком песка на противокоррозийную защиту трубопровода.

Как показали расчеты [4] защита подводного перехода трубопровода с использованием ПБЗГУ всегда устойчива от воздействия льда, независимо от скорости потока и свойств грунта. Она не может быть разрушена динамическим воздействием льда, а также надежно противостоит силе давления льда при образовании ледяных заторов.

Заключение

Анализ результатов проведенных расчетно-теоретических исследований дает возможность сделать следующие выводы:

1. Защита из ПБЗГУ значительно снижает горизонтальную силу давления потока воды на подводный трубопровод и полностью исключает вертикальную подъемную силу. Это повышает устойчивость подводного трубопровода на всплытие и сдвиг и позволяет укладывать его без дополнительной балластировки, что снижает стоимость строительства трубопровода и повышает надежность его работы.

2. Защита из ПБЗГУ снижает вибрационные нагрузки на подводный трубопровод, значительно уменьшая частоту и амплитуду его колебаний, а также предотвращает возможность появления резонансных колебаний трубопроводов.

3. Защита из ПБЗГУ надежно выдерживает удары различных предметов, переносимых потоком воды, предотвращая от повреждений и деформаций, как саму трубу, так и противокоррозийную защиту и футеровку.

4. Защита из ПБЗГУ надежно предохраняет подводный трубопровод от разрушения динамическим воздействием льда, а также противостоит силе давления льда при образовании заторов.

5. Защита из ПБЗГУ предохраняет подводный переход от размыва грунта, значительно снижает глубину воронки размыва и защищает противокоррозийное покрытие трубопровода от абразивного износа.

Рекомендации

На основании проведенных гидравлических расчетов Покрытия бетонные защитные гибкие универсальные (ПБЗГУ) могут быть рекомендованы как эффективное средство для повышения устойчивости подводных трубопроводов на всплытие и на сдвиг, снижения вибрационных нагрузок, а также защиты, как самого трубопровода, так и его антикоррозийной изоляции и футеровки от повреждений.

Список использованной литературы

1. Левин С.И. Подводные трубопроводы. –М.: «Недра», 1970 – 228с.

2. Бородавкин П.П. Сунаргин А.Х. Строительство магистральных трубопроводов в сложных условиях. –М.: «Недра», 1965 – 214с.

3. Плиты бетонные защитные гибкие универсальные (ПБЗГУ) // ТУ 5859-002 59565714-2012. –Воронеж: ООО «Спецпром 1», 2012 – 39с.

4. Исследование универсальных гибких защитных бетонных матов (УГЗБМ). Гидравлические расчеты // Технический отчет по договору №09/05-10. – Воронеж: ЦНИСЭС, 2005 – 35с.

5. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. –М.: Стройиздат, 1972. – 110с.

6. Примеры расчетов по гидравлике. Под ред. А.Д. Альтшуля. – М.: Стройиздат, 1976 – 255с.

7. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 625с.

8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: «Наука», 1970. – 544с.

Приложение

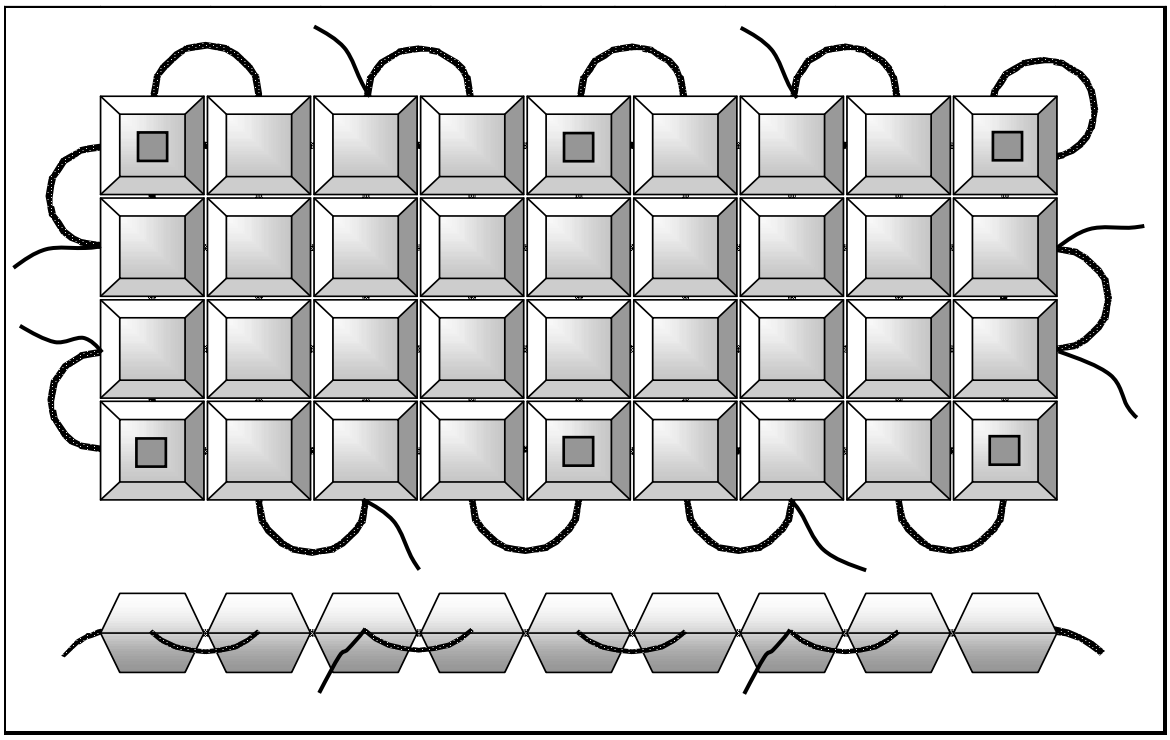

Рис. 1. Конструкция ПБЗГУ модели № 1

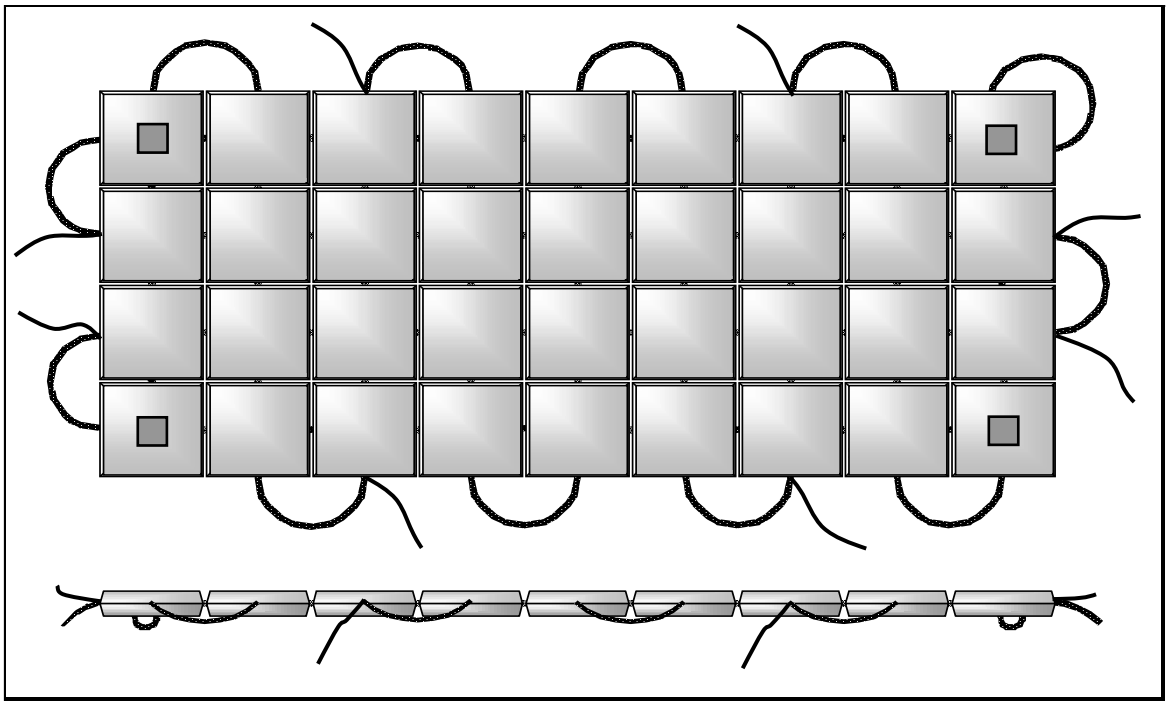

Рис. 2. Конструкция ПБЗГУ модели № 2

Продолжение прил.

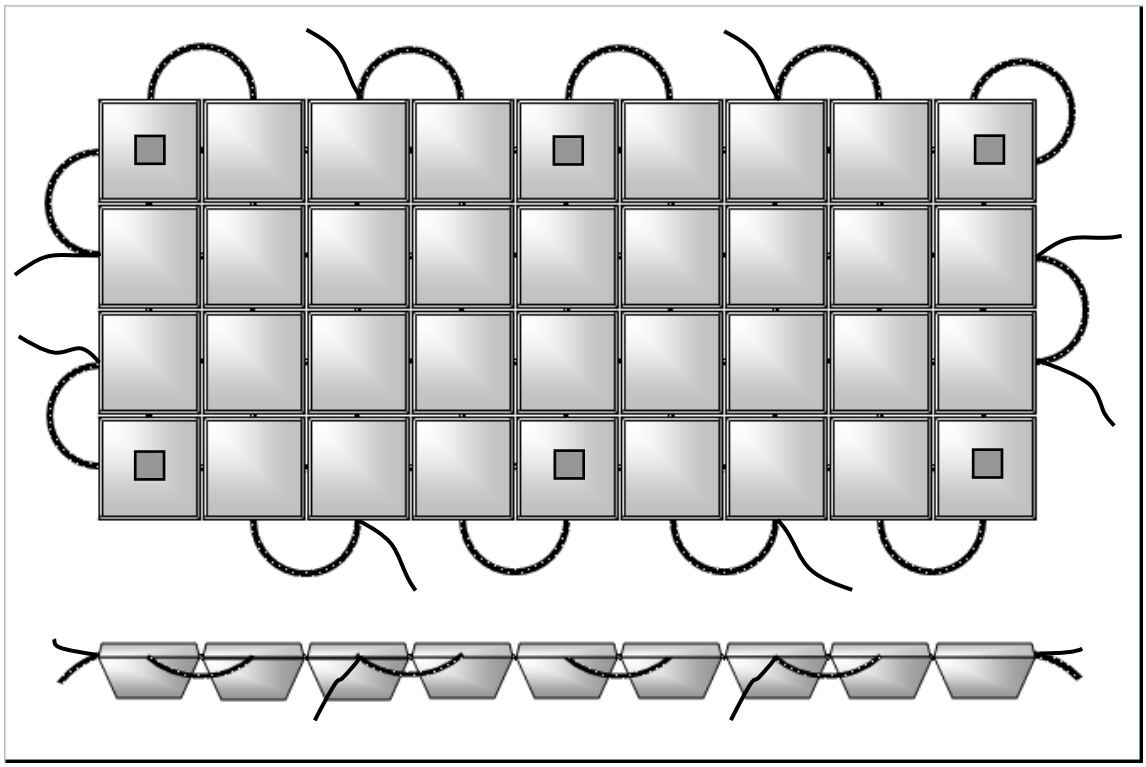

Рис. 3. Конструкция ПБЗГУ модели № 4

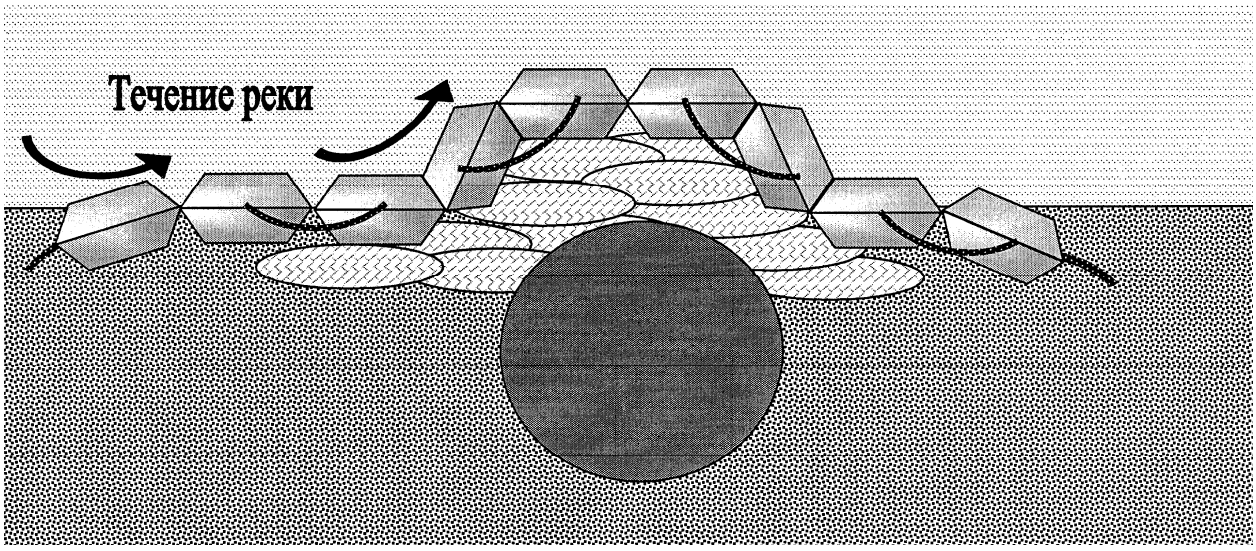

Рис. 4. Защита подводного трубопровода с помощью ПБЗГУ

Продолжение прил.

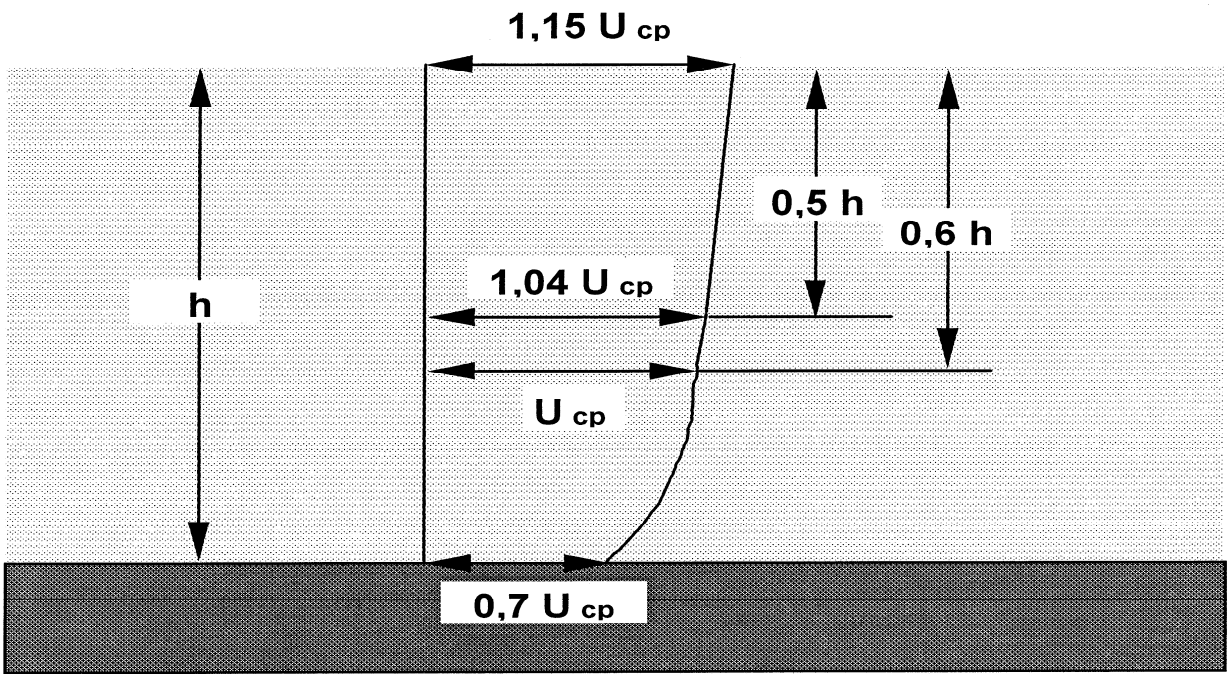

Рис. 5. Эпюра распределения скоростей течения по глубине потока