Экз.№__

Система ведомственных нормативных документов по проектированию, строительству и эксплуатации объектов Министерства обороны Российской Федерации

ВЕДОМСТВЕННЫЙ СВОД ПРАВИЛ

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАСЧЕТУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЯКОРНЫХ СИСТЕМ ПЛАВУЧИХ ОБЪЕКТОВ ВМФ

ВСП 33-01-~~XX~~ 99

МО РФ

Издание официальное

Начальник строительства и расквартирования войск - Заместитель Министра обороны Российской Федерации Главнокомандующий ВМФ

Москва
2000

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 Настоящая Инструкция предназначена для использования в проектных организациях ВМФ. В Инструкции приведены основные требования, предъявляемые к якорным системам плавучих гидротехнических сооружений, и общие рекомендации по определению параметров и расчету якорных систем.

2 В процессе разработки Инструкции выполнено обобщение отечественного и зарубежного опыта проектирования плавучих сооружений на якорях и обоснование расчетных положений.

3 В разработке Инструкции принимали участие: Бабчик Д.В., Васюк С.М., Заритовский Н.Г., Иванов И.В., Керро В.А., Мищенко С.М., Нуднер И.С.

4 При составлении Инструкции использованы результаты исследований, проведенных профессором П.П.Кульмачем.

5 ВСП 33-01-ХХ введен впервые.

Настоящая Инструкция не может быть полностью или частично воспроизведена, тиражирована и распространена в качестве официального издания без разрешения УНСИОР ВМФ и НТК Начальника строительства и расквартирования войск МО РФ

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Общие положения 4
4 Рекомендации по проектированию якорных систем 7
4.1 Общие требования 7
4.2 Комплектация якорных связей 10
4.3 Якорные системы плавучих причалов 13
4.4 Якорные системы плавучих волноломов 18
4.5 Якорные системы плавучих доков 18
4.6 Якорные системы одноточечных рейдовых причалов 23
5 Указания по расчету якорных систем 30
5.1 Последовательность расчета якорных систем 30
5.2 Нагрузки и воздействия 30
5.3 Указания по методике выполнения расчетов якорных систем 40
Приложение А Перечень нормативных документов, подлежащих учету при проектировании якорных систем плавучих гидротехнических сооружений 54
Приложение Б Статические расчеты якорных систем в плоской постановке задач 56
Приложение В Основы динамики плавучих объектов на якорях в плоской постановке задач 97
Приложение Г Динамика якорных связей как элементов якорных систем 118
Приложение Д Расчет распределения внешней нагрузки между якорными связями 128
Приложение Е Примеры расчета якорных систем 138

Ведомственный нормативный документ по расчету и проектированию якорных систем плавучих объектов Военно-морского Флота Министерства обороны Российской Федерации

Инструкция по расчету и проектированию якорных систем плавучих объектов ВМФ

Дата введения ..... 199....г.

1 Область применения

Настоящая Инструкция устанавливает требования к разработке и проектированию якорных систем плавучих гидротехнических сооружений ВМФ (плавучих причалов, доков, оградительных сооружений и т.п.), удерживаемых в заданных местах акваторий с помощью гибких якорных связей.

Положения настоящей Инструкции подлежат применению при проведении работ, связанных с раскреплением плавучих гидротехнических сооружений, обтяжкой якорных связей, и включают общие указания по определению параметров и расчету якорных систем.

Положения настоящей Инструкции подлежат применению проектными организациями и организациями, эксплуатирующими плавучие гидротехнические сооружения ВМФ.

Издание официальное

2 Нормативные ссылки

В настоящей Инструкции использованы ссылки на следующие нормативные документы:

- ГОСТ 228-79 (СТСЭВ 713-83). Цепи якорные. Общие технические условия;

- СНиП 2.06.01-86. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования;

- СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов);

- СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия;

- СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений;

- СНиП II-28-73. Защита строительных конструкций от коррозий;

- Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. - Л.: Транспорт, 1995;

- Инструкция по проектированию одноточечных рейдовых плавучих причалов для крупных кораблей ВМФ: ВСН-17-84/Минобороны;

- Инструкция по расчету внешних сил и систем заякорения плавучих доков: И-ЗПД/Минобороны;

- Инструкция по расчету держащей силы железобетонных якорей и якорных систем рейдовых стоянок/Минобороны;

- Правила технической эксплуатации акваторий и гидротехнических сооружений ВМФ. Приложение к приказу Главнокомандующего ВМФ 1976г. №177;

- Правила эксплуатации и содержания рейдового оборудования ВМФ. Приложение к приказу Главнокомандующего ВМФ 1985г. №20;

- Правила технической эксплуатации плавучих причалов ВМФ. Приложение к приказу Главнокомандующего ВМФ 1972г. №352;

Указания по обеспечению долговечности бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений: ВСН 6/118-74 /Минморфлот, Минтрасстрой.

3 Общие положения

3.1 При проектировании раскрепления плавучих гидротехнических сооружений следует руководствоваться соответствующими разделами глав СНиП по проектированию речных и морских гидротехнических сооружений, требованиями Правил классификации и постройки морских судов, утвержденных Регистром судоходства, и указаниями других документов согласно приложению А.

3.2 Плавучее гидротехническое сооружение представляет собой стальной, железобетонный или композитный плавучий корпус, удерживаемый в заданном месте акватории с помощью якорной системы. Плавучий корпус представляет собой единый жесткий блок или состоит из ряда отдельных блоков, как правило, шарнирно соединенных между собой. Плавучее сооружение устанавливается на защищенных или полузащищенных акваториях ливных или безливных морей.

Раскрепление плавучего сооружения следует выполнять по индивидуальному проекту с учетом назначения и размеров сооружения, видов и величин действующих нагрузок, глубин и грунтов дна акватории в месте установки, технологических условий эксплуатации.

3.3 При определении расчетных значений усилий в элементах якорных систем необходимо учитывать класс и срок службы плавучих гидротехнических сооружений. Класс сооружений надлежит принимать по таблице 1.

3.4 При разработке проекта якорных систем должны учитываться основные режимы эксплуатации плавучего сооружения.

Рабочее состояние - состояние, при котором производятся технологические операции и работы на плавучем сооружении, а внешние воздействия и эксплуатационные нагрузки не выходят за пределы соответствующих расчетных значений.

Таблица 1

Наименование плавучих сооружений	Показатели, определяющие класс сооружения	Классы сооружений	
		основных	второстепенных
Причалы, устанавливаемые у берега в виде пирсов	Водоизмещение швартующихся кораблей, тыс.тонн:		
	- менее 10	3	5
	- от 10 до 20	2	4
	- более 20	1	2
Одноточечные рейдовые причалы и причалы на швартовных бочках	Водоизмещение швартующихся кораблей, тыс.тонн:		
	- менее 10	4	5
	- от 10 до 20	3	4
	- от 20 до 30	2	3
	- более 30	1	2
Плавучие оградительные сооружения (плавучие волноломы)	Гашение волн высотой, м:		
	- до 2	3	4
	- от 2 до 4	2	3
	- более 4	1	3
Плавучие доки	Грузоподъемность дока, тыс.тонн:	3	4
	- до 10	2	4
	- от 10 до 20	1	2
	- более 20		

Примечания

1 К второстепенным относятся сооружения, срок службы которых не превышает пяти лет или вывод из эксплуатации которых не приводит к нарушению работы основных сооружений объекта.

2 Временные сооружения, рассчитанные на эпизодическую эксплуатацию, на срок до 2-3 лет, должны относится к 5 классу сооружений, за исключением случаев, когда на временное сооружение накладывается особо ответственная задача или вывод из эксплуатации его приводит к нарушению работы основных сооружений объекта, тогда временное сооружение должно относится к 4 или 3 классу.

Штормовой отстой - состояние плавучего сооружения при воздействии на него максимальных расчетных внешних нагрузок, при котором предполагается прекращение производства технологических операций.

3.5 В проекте раскрепления следует указывать периодичность мероприятий по контролю за техническим состоянием якорной системы, периодичность проведения дополнительных обтяжек якорных связей и их замены.

4 Рекомендации по проектированию якорных систем

4.1 Общие требования

4.1.1 Якорные системы удержания плавучих гидротехнических сооружений в общем случае включают:

- гибкие якорные связи (цепи и тросы), соединяющие плавучее сооружение с якорными опорами;

- якорные опоры (якоря или анкерные устройства), укладываемые на дно или закрепляемые в грунте;

- грузы (железобетонные массивы, чугунные блоки и т.п.), подвешиваемые к якорным связям;

- устройства для крепления якорных связей к якорным опорам, грузам и плавучему корпусу.

Для удержания плавучих причальных и оградительных сооружений, устанавливаемых у берега в виде пирсов, кроме якорных систем допускается использовать также жесткие или амортизированные штанги, соединяющие шарнирно плавучий корпус с берегом и ограничивающие его перемещения в горизонтальных направлениях.

4.1.2 В задании на проектирование раскрепления плавучего гидротехнического сооружения должны быть определены:

- размерения и характеристики плавучего сооружения и обслуживаемых им кораблей;

- план промеров глубин с указанием препятствий на акватории;

- ситуационный план с предлагаемой разбивкой осей плавучего сооружения на местности;

- материалы инженерно-геологических изысканий и гидрометеорологические условия в месте установки сооружения;

- технологические, коммуникационные и другие требования, предъявляемые к плавучему сооружению в эксплуатационном режиме.

4.1.3 В результате разработки проекта якорной системы плавучего сооружения должны быть определены:

- количество якорных связей, места их присоединения к плавучему корпусу, места расположения якорных опор на дне акватории;

- длины якорных связей, калибр и категория прочности якорных цепей или тип и диаметр канатов;

- комплектация якорных связей;

- тип и масса якорных опор;

- масса грузов, подвешиваемых к якорным связям, и места их расположения на связях;

- требования к обтяжке якорных связей при установке сооружения в проектное положение.

Кроме того должны быть разработаны:

- мероприятия по обеспечению долговечности якорных связей и анкерных опор;

- способы и последовательность действий при установке плавучего сооружения;

- требования к режиму эксплуатации плавучих сооружений.

4.1.4 Конструкция якорной системы должна выбираться с учетом:

- глубин, уклонов дна и колебаний уровня воды на акватории;

- направления, параметров и повторяемости волн, ветра и течений;

- ледового режима на акватории;

- назначения и размеров сооружения и обслуживаемых им кораблей;

- характеристик устройств, предусмотренных в плавучем корпусе для крепления якорных связей (количества, расположения, типа и размера клюзов, стопоров и других устройств).

4.1.5 При конструировании якорных систем максимально должны использоваться типовые конструкции якорных опор и грузов, подвешиваемых к якорным связям, а также должна учитываться грузоподъемность устройств, применяемых при монтаже якорных систем.

Конструкцию якорной системы следует принимать наиболее простой, обеспечивающей, по возможности, равномерное распределение нагрузок между якорными связями. Преимущественно следует применять связи с большей массой единицы длины, но при меньшем их количестве.

4.1.6 Якорная система должна обеспечивать возможность вертикального перемещения плавучего корпуса при колебаниях уровня моря без существенного изменения его осадки и должна ограничивать горизонтальные перемещения корпуса в пределах значений, установленных технологическими или другими требованиями.

4.1.7 Якорные системы должны обладать стойкостью против коррозии и истирания при воздействии морской воды и волн. В качестве якорных связей предпочтительно применять якорные цепи, как наиболее надежные и долговечные.

При достаточном обосновании в качестве якорных связей постоянно работающих на натяжение допускается применять стальные канаты по ГОСТ 3083-80 с сердечниками из асбестового шнура по ГОСТ 1779-83, пропитанных составом Е-1 по ГОСТ 15037 и обработанных дополнительно смазкой Тореиол-55 или 39У. Стальные канаты должны быть нераскручивающиеся из проволоки марки 1, оцинкованной для особо жестких условий работы.

Соединительные элементы якорных связей с плавучим корпусом для увеличения сопротивления истиранию рекомендуется назначать более крупных размеров, чем необходимо по расчету.

4.1.8 Для раскрепления плавучих гидротехнических сооружений, как правило, следует применять гравитационные якоря кругового действия или

судовые якоря направленного действия с повышенной держащей силой. Судовые якоря допускается использовать при многоякорном раскреплении объектов в случае ровного дна акватории, сложенного грунтами осадочных пород (пески, глины, илы и т.п.).

При выборе типов якорей и мест расположения их на акватории необходимо предусматривать, что расчетная держащая сила судовых якорей набирается только после проползания их по дну на расстоянии 10-15 м, а проползание гравитационных якорей может составлять 2-5 м. Кроме того следует учитывать возможные проползания судовых якорей по дну в процессе эксплуатации плавучих сооружений и вызываемые этим изменения жесткостных показателей системы, уменьшения подводных габаритов у кордона сооружения и т.п.

4.2 Комплектация якорных связей

4.2.1 Для удержания плавучих сооружений следует применять гибкие якорные связи: якорные цепи, стальные канаты, комбинированные якорные канаты, включающие участки из цепей и стальных канатов. Якорные связи из стальных и комбинированных якорных канатов рекомендуется применять при установках постоянных сооружений на глубинах больше 200 м и для раскрепления временных сооружений 4 и 5 классов. При глубинах воды до 200 м, как правило, должны применяться якорные цепи. Для удержания постоянных сооружений рекомендуется использовать якорные цепи повышенной прочности (второй категории), а для постоянных сооружений 1-2 классов, устанавливаемых в условиях открытых акваторий, якорные цепи особой прочности (третьей категории) с учетом принятого запаса прочности.

При выборе и конструировании якорного каната следует обеспечить равную прочность и долговечность различных его участков.

4.2.2 Якорные связи из цепей, как правило, должны комплектоваться из отдельных смычек. При этом следует выделять: якорную смычку, крепящуюся к якорю, промежуточные смычки, коренную смычку, крепящуюся к плавучему сооружению.

Якорная смычка должна состоять из вертлюга, концевого звена, концевой скобы и минимального количества общих и увеличенных звеньев в соответствии с рисунком 1а,б.

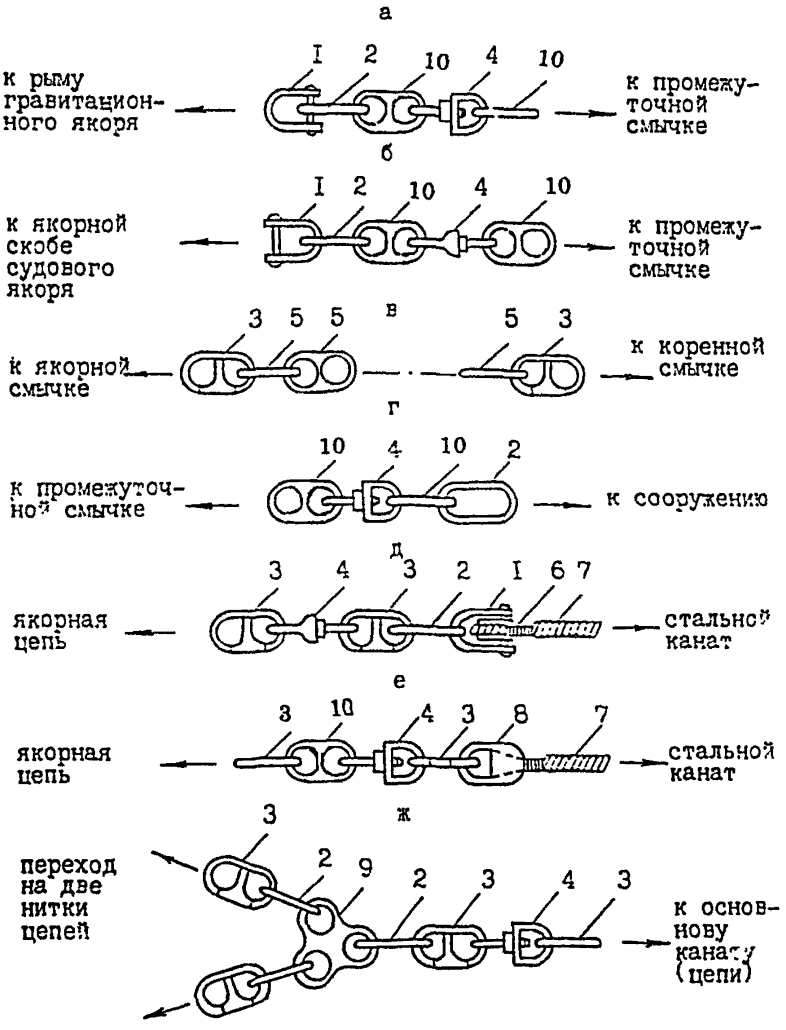
Якорная смычка к рыму гравитационного якоря должна прикрепляться концевой скобой так, чтобы дуга скобы была обращена к якорю, а штырь скобы проходил через концевое звено цепи. При этом штырь вертлюга должен быть обращен к якорю. В якорной смычке для судовых якорей штырь концевой скобы должен закладываться в скобу якоря, а штырь вертлюга должен быть обращен к промежуточной смычке.

Промежуточные смычки должны состоять из общих звеньев и двух соединительных звеньев, установленных по концам смычки в соответствии с рисунком 1в.

Комплектация коренной смычки должна выполняться с учетом крепления якорного каната к плавучему корпусу. Как правило, коренная смычка должна состоять из концевого звена, вертлюга и увеличенных звеньев в соответствии с рисунком 1г. Штырь вертлюга должен быть обращен к якорю.

Длины промежуточных смычек в соответствии с условиями поставок промышленностью должны принимать в диапазоне 25,0-27,5 м. Длины якорной и коренной смычек не регламентируются. Общая длина укомплектованного якорного каната должна учитывать запас длины цепи, необходимый для монтажа якорной связи.

В отдельных случаях допускается выполнять якорные цепи не разделяя их на смычки. При этом в состав цепи возможно ближе к якорю должен быть включен вертлюг.



а, б - якорные смычки; в - промежуточная смычка; г - коренная смычка; д, е - соединение цепи со стальным канатом; ж - фертоинг;

1 - скоба концевая; 2 - звено концевое; 3 - звено соединительное; 4 - вертлюг; 5 - звено общее; 6 - коуш; 7 - стальной канат; 8 - звено-патрон; 9 - фертоинговая скоба, 10 - звено увеличенное

Рисунок 1 Комплектация якорных связей

4.2.3 Для комбинированных якорных канатов конструкции соединений различных участков, как правило, должны быть неразъемными, исключающими самопроизвольное (или под воздействием случайных факторов) разъединение.

Соединение цепи со стальным канатом рекомендуется выполнять с помощью специально изготовленного звена-патрона или коуша на конце каната и концевой скобы в соответствии с рисунком 1д,е.

Переход с одной нитки цепи на две следует выполнять при помощи фертоингов в соответствии с рисунком 1ж.

4.2.4 Укомплектованная якорная связь должна иметь маркировку с указанием установочной длины каната и мест крепления подвесных грузов За установочную длину следует принимать длину якорного каната от точки крепления его к плавучему корпусу до якоря.

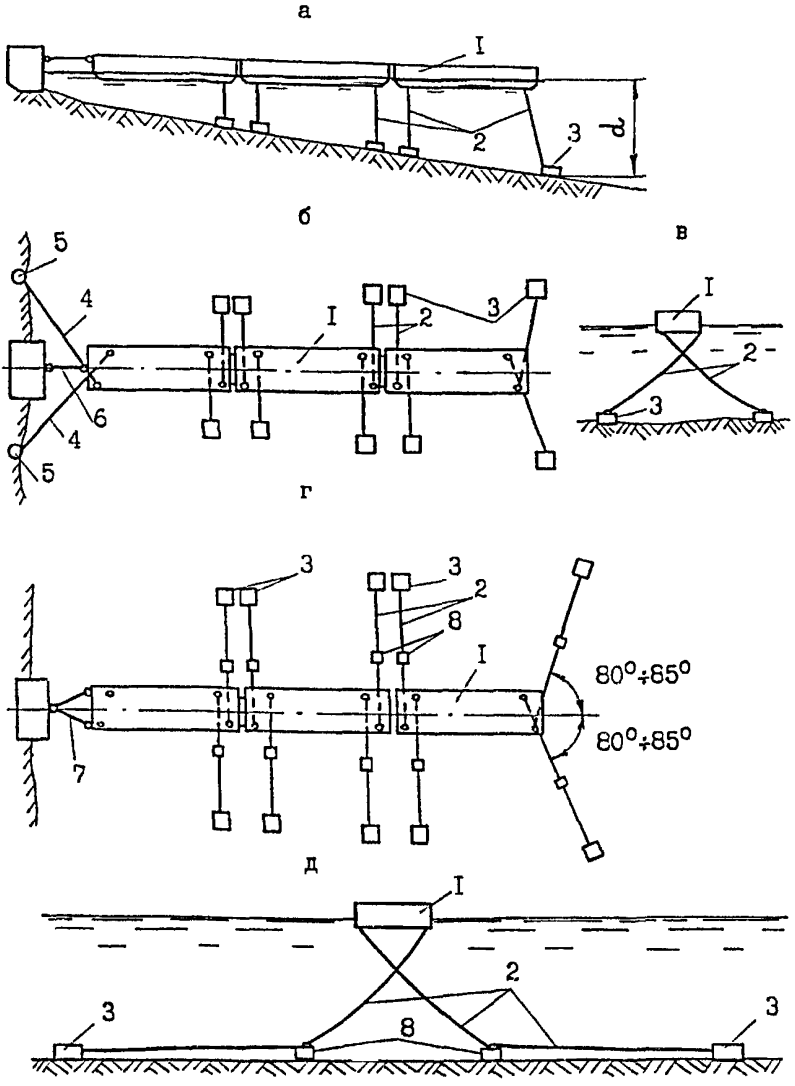
4.3 Якорные системы плавучих причалов

4.3.1 В якорных системах плавучих причалов следует применять перекрестное (подкильное) расположение якорных связей в соответствии с рисунком 2. Преимущественно следует применять системы с подвесными грузами.

Системы удержания без грузов допускается применять для причалов устанавливаемых на акваториях с колебаниями уровня воды менее 1,0 м, при волнении с высотами волн в месте установки не превышающими:

- 1,0-1,2 м - для плавучих металлических причалов;
- 1,2-1,5 м - для плавучих железобетонных причалов.

4.3.2 Якорная система не должна создавать помех и опасностей при подходе и стоянке кораблей. В случае недостаточной глубины у причала установку якорных опор и подвесных грузов следует предусматривать в котлованах (выемках).



а, б, в - на коротких якорных связях без подвесных грузов;
г, д - на длинных якорных связях с подвесными грузами;
1 - понтоны причалов; 2 - якорные связи; 3 - якоря; 4 - береговые растяжки; 5 – береговые опоры; 6 - соединительная штанга (V-образная); 8 - подвесные грузы

 Рисунок 2 - Схемы раскрепления плавучих причалов

Якорные связи, как правило, следует располагать в плане перпендикулярно к продольной оси причала и симметрично относительно точки приложения внешней горизонтальной нагрузки.

Для ограничения перемещений транца корневого понтона плавучего причала, соединенного с берегом одинарной штангой, рекомендуется применять береговые растяжки.

4.3.3 Обтяжку якорных связей при установке плавучих причалов следует предусматривать в диапазоне горизонтов воды:

- от минимального до среднего - в морях с колебаниями уровня до 2,0 м;
- от минимального до горизонта воды, превышающего минимальный на 1,5 м - в морях с колебаниями более 2,0 м.

При этом рекомендуется принимать значение горизонтальной составляющей натяжения в якорных связях при обтяжке по таблице 2 с учетом допустимого отклонения ±10 кН.

Таблица 2

Глубина воды у транца головного понтона d, м	до 20	40	60	80	более 100
Горизонтальная составляющая натяжения в цепях при обтяжке H_0, кН	40	50	60	80	100

4.3.4 Длины якорных связей и положение подвесных грузов на них должны выбираться из условия ограничения возможных перемещений корпуса причала с учетом способов установки якорей и монтажа якорных систем.

Длины якорных связей должны назначаться с учетом указаний п.4.2.2. При этом расчетную длину связи S_0, м, от клюза до подвесного груза следует определять по формуле

$$S_0 = \sqrt{\left[\frac{2H_0}{q}\,\mathrm{sh}\left(\frac{q\eta}{2H_0}\right)\right]^2 + (d_A - T)^2}\,, \qquad (1)$$

где H_0 - горизонтальная составляющая натяжения в якорных связях при обтяжке, принимаемая по таблице 2, кН;

q - сила тяжести (веса) единицы длины якорной связи в воде, кН/м;

η - расстояние по горизонтали от точки крепления связи к корпусу причала (от клюза) до подвесного груза, которое рекомендуется выбирать в диапазоне $\eta=(0{,}7\text{-}1{,}0)d_A$, м, в соответствии с рисунком 3а;

d_A - глубина воды у клюзовой опоры рассматриваемой якорной связи, м;

T - осадка плавучего причала, м.

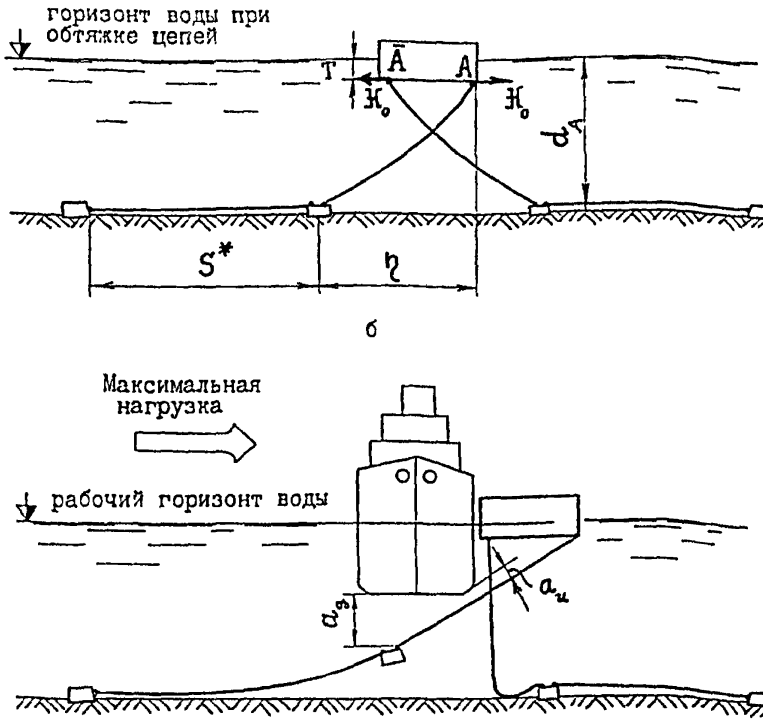
Длину якорной связи S*, м, от подвесного груза до якоря рекомендуется принимать на 5-10 м больше глубины воды в месте постановки якоря с учетом высоты прилива.

4.3.5 Массу подвесных грузов следует назначать из условия обеспечения необходимого подводного габарита у кордона причала. При максимально возможных смещениях причала расстояния a_u, a_g от корпуса ошвартованного корабля до якорных связей и до подвесных грузов должны быть соответственно не менее 0,7 и 1,0 м, как показано на рисунке 3б.

Предварительно рекомендуется назначать железобетонные грузы массой:

- 20 т - при водоизмещении швартующихся у причала кораблей до 10 тыс.тонн;

- 30 т - при водоизмещении кораблей 10-20 тыс.тонн;



а - при обтяжке цепей; б - для определения обеспеченного габарита

Рисунок 3 - Схема якорной системы плавучего причала

- 40 т - при водоизмещении кораблей больше 20 тыс.тонн.

Окончательная масса подвешенных к связям грузов назначается после выполнения расчетов якорной системы.

4.4 Якорные системы плавучих волноломов

4.4.1 В якорных системах плавучих волноломов целесообразно использовать якорные цепи особой прочности. При воздействии волнения в составе якорных связей следует предусматривать амортизирующие элементы, уменьшающие рывковые усилия в связях при колебаниях сооружения.

Для повышения надежности работы якорных систем рекомендуется предусматривать дублирование якорных канатов и включение в систему дополнительных страховочных связей.

4.4.2 Для предварительных расчетов натяжения в начальном состоянии в якорных цепях следует принимать равным 20% от расчетного рабочего усилия в них.

Масса подвесных грузов, как правило, должна приниматься не более 20 т, а длины якорных цепей следует назначать больше 3-4 глубин воды в месте установки.

4.4.3 Принятые решения по якорному раскреплению плавучих волноломов 1 и 2 классов, как правило, должны проверяться лабораторными исследованиями.

4.5 Якорные системы плавучих доков

4.5.1 В составе якорных систем удержания плавучих доков следует предусматривать поперечные и продольные якорные связи. Якоря, по возможности, следует размещать симметрично относительно продольной и поперечной осей дока в соответствии с рисунком 4.

Для удержания плавучих доков следует применять обыкновенные (прямые) и перекрестные (подкильные) якорные системы с подвесными грузами и без грузов. При принятии решения по схеме раскрепления плавучего дока должны учитываться рациональное использование акватории и обеспечение нормальной эксплуатации соседних сооружений, возможности монтажа якорного устройства.

При наличии свободной неиспользуемой акватории для раскрепления плавучих доков следует применять прямое расположение якорных связей без грузов в соответствии с рисунком 4а.

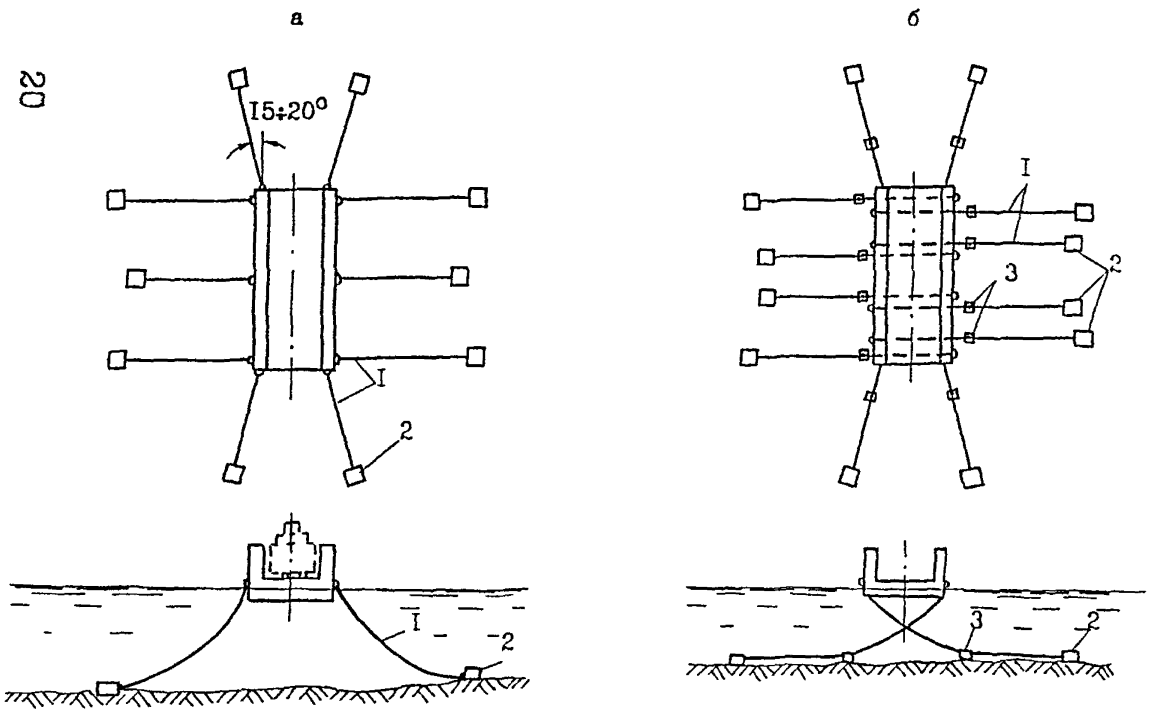
Перекрестное (подкильное) расположение связей с грузами следует использовать в условиях стесненных акваторий в соответствии с рисунком 4б.

4.5.2 Длины и другие характеристики якорных связей должны назначаться из условия выполнения требований по ограничению горизонтальных перемещений корпуса плавучего дока. Назначение предварительного натяжения в якорных связях должно учитывать возможную грузоподъемность устройств, применяемых при обтяжке связей.

Длины цепей S, м, при раскреплении плавучего дока на якорных цепях без грузов допускается принимать по таблице 3, в которой рекомендуемые значения длин S учитывают равномерность распределения нагрузок между цепями рабочего борта и отсутствие вертикальной нагрузки на якоря. В этом случае за расчетное значение H_0, кН, горизонтальной составляющей натяжения в цепях при обтяжке рекомендуется принять среднее для всех цепей значение, вычисленное по формуле

$$H_0=\chi q d_в, \qquad (2)$$

где χ - коэффициент, учитывающий ограничение перемещений дока,



а - обыкновенная (прямая) без подвесных грузов; б - перекрестная с подвесными грузами;
1 - якорные связи; 2 - якоря; 3 - подвесные грузы

Рисунок 4 - Схемы раскрепления плавучих доков

определяется по рисунку 5, на котором u - значение предельно допустимого горизонтального перемещения корпуса плавучего дока, м;

$d_в$ - глубина воды в месте установки якоря, м;

q - сила тяжести (веса) единицы длины якорной цепи в воде, кН/м.

Таблица 3

Глубина воды в месте установки якоря $d_в$, м		10	20	40	60	80	100
Длина якорной цепи, м	Второй категории	155	220	315	380	445	500
	Третьей категории	185	260	370	455	525	590

При схеме раскрепления плавучего дока на якорных цепях с подвесными грузами предварительно допускается назначать массу железобетонных грузов:

- от 5 до 10 т - для доков грузоподъемностью до 10 тыс.тонн;
- от 10 до 20 т - для доков грузоподъемностью 10-20 тыс.тонн;
- от 20 до 40 т - для доков грузоподъемностью более 20 тыс.тонн.

При этом длины S*, м, нижних участков цепей от грузов до якорей рекомендуется принимать в пределах $1 \div 2d_в$ ($d_в$ - глубина воды в месте постановки якоря, м).

Длины S_0, м, верхних участков цепей от клюзов до подвесных грузов допускается определять по формуле

$$S_0 = \chi_S d_в, \qquad (3)$$

где χ_S - коэффициент, учитывающий глубину воды $d_в$, силу тяжести

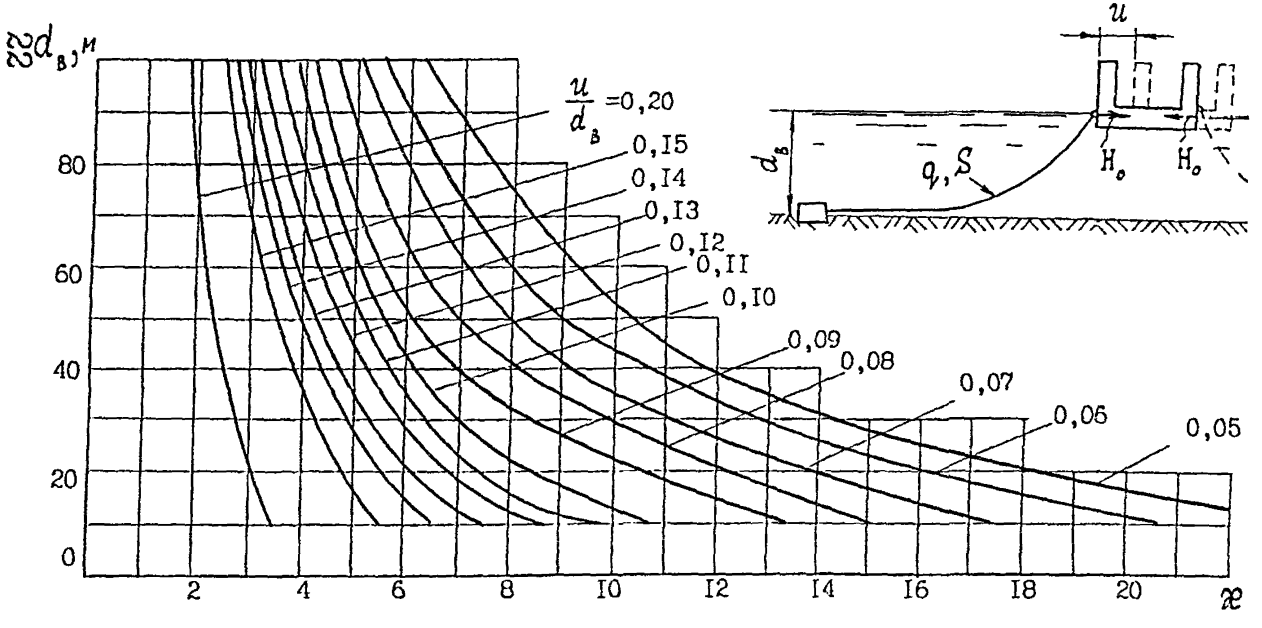


Рисунок 5 - Графики значений коэффициента χ при раскреплении плавучего дока на якорных цепях без подвесных грузов

(вес) G подвесного груза и силу тяжести q единицы длины якорной цепи с учетом взвешивания в воде, определяется для цепей второй категории по графикам рисунка 6.

Примечание - Для цепей третьей категории полученное по рисунку 6 значение χ_S должно быть умножено на коэффициент равный 1,15.

За расчетное значение H_0, кН, горизонтальной составляющей натяжения в цепях при обтяжке рекомендуется принимать среднее для всех цепей значение, вычисляемое по формуле (2). При этом коэффициент χ следует принимать в зависимости от величин $d_в$, G, q и значения u предельно допустимого горизонтального перемещения корпуса дока по графикам на рисунках 7-10.

Выбранные таким образом параметры якорных систем должны уточняться после выполнения расчетов.

4.5.3 При установках плавучих доков в сложных естественных условиях необходимо предусматривать мероприятия для выравнивания усилий между отдельными якорными связями рабочего борта и меры по усилению крайних бортовых цепей (например, применение сдвоенных цепей).

4.5.4 При раскреплении плавучих доков на гравитационных якорях для уменьшения их массы при сохранении держащей силы допускается предусматривать заглубление якорей в грунт, их обсыпку или устройство перед ними упорных призм, а также устройство составных якорей из ряда соединяемых между собой одиночных якорей.

4.6 Якорные системы одноточечных рейдовых причалов

4.6.1 Конструкция якорной системы удержания одноточечных рейдовых причалов должна приниматься в зависимости от водоизмещения швартующихся кораблей (судов), глубин и грунтов дна акватории, величин расчетных

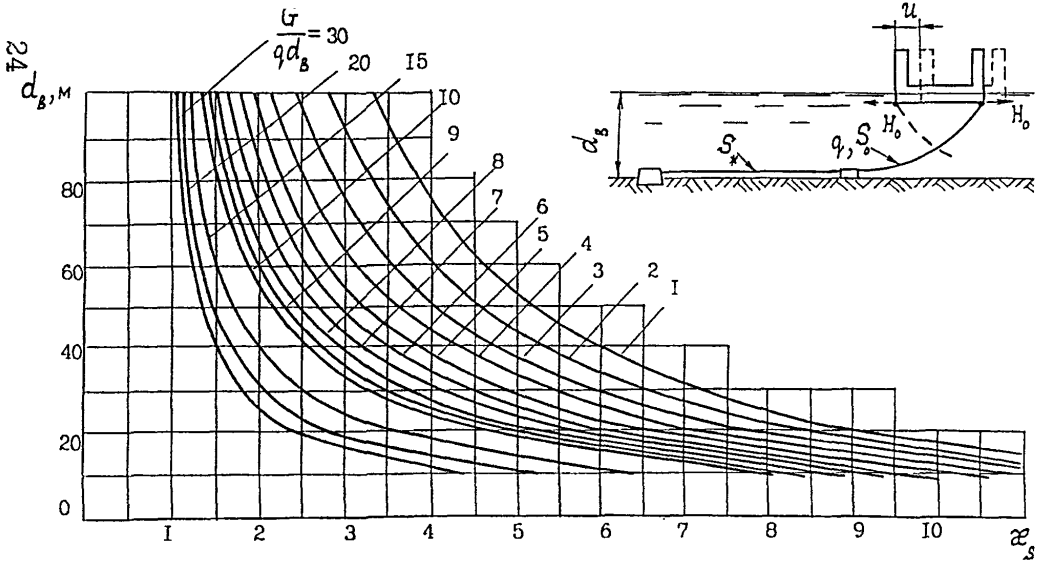


Рисунок 6 - Графики значений коэффициента χ_s (для цепей второй категории)

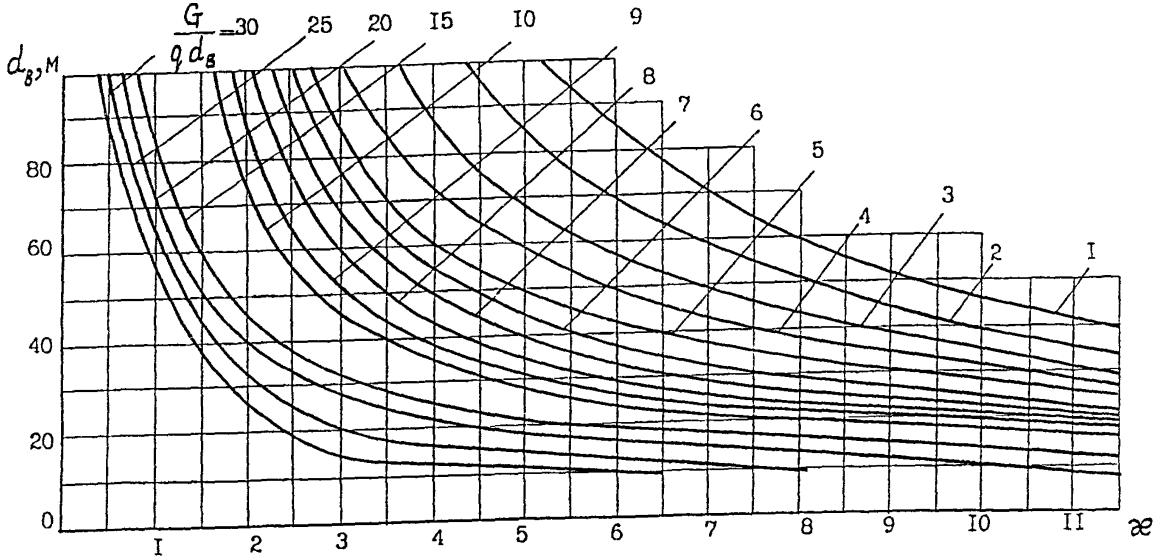


Рисунок 7 - Графики значений коэффициента χ при раскреплении плавучего дока на якорных цепях с грузами и ограничении перемещений корпуса дока $n=0,05d_в$

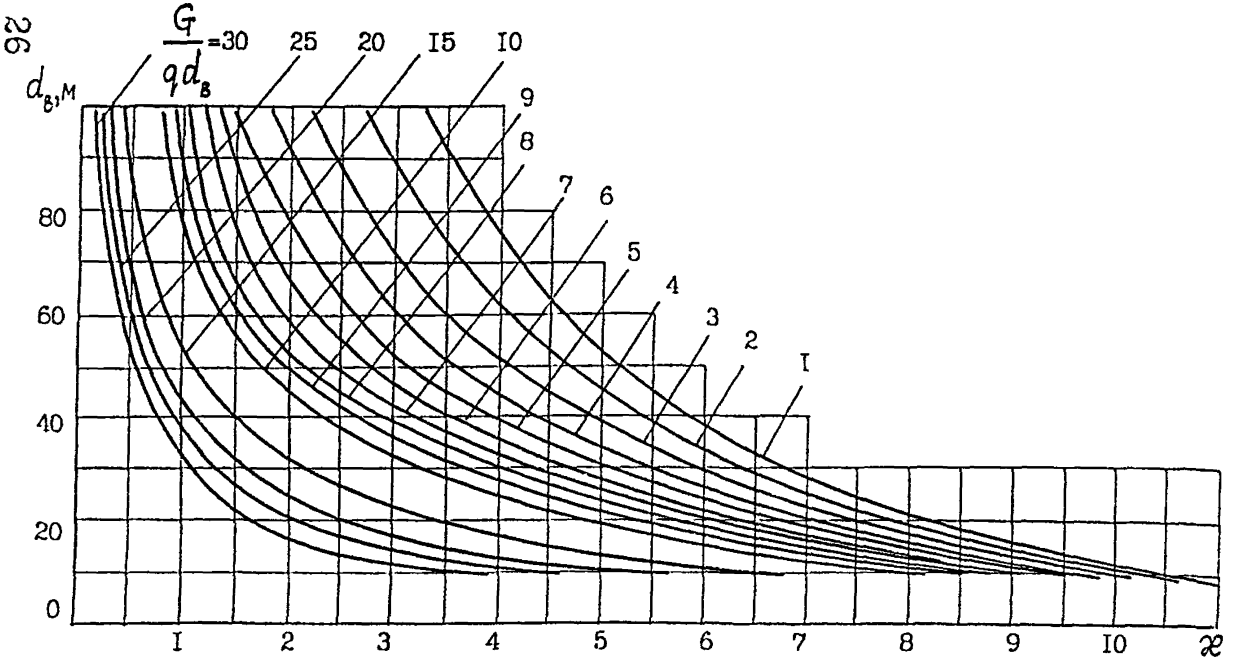


Рисунок 8 - Графики значений коэффициента χ при раскреплении плавучего дока на якорных цепях с грузами и ограничении перемещений корпуса дока $u=0,10d_в$

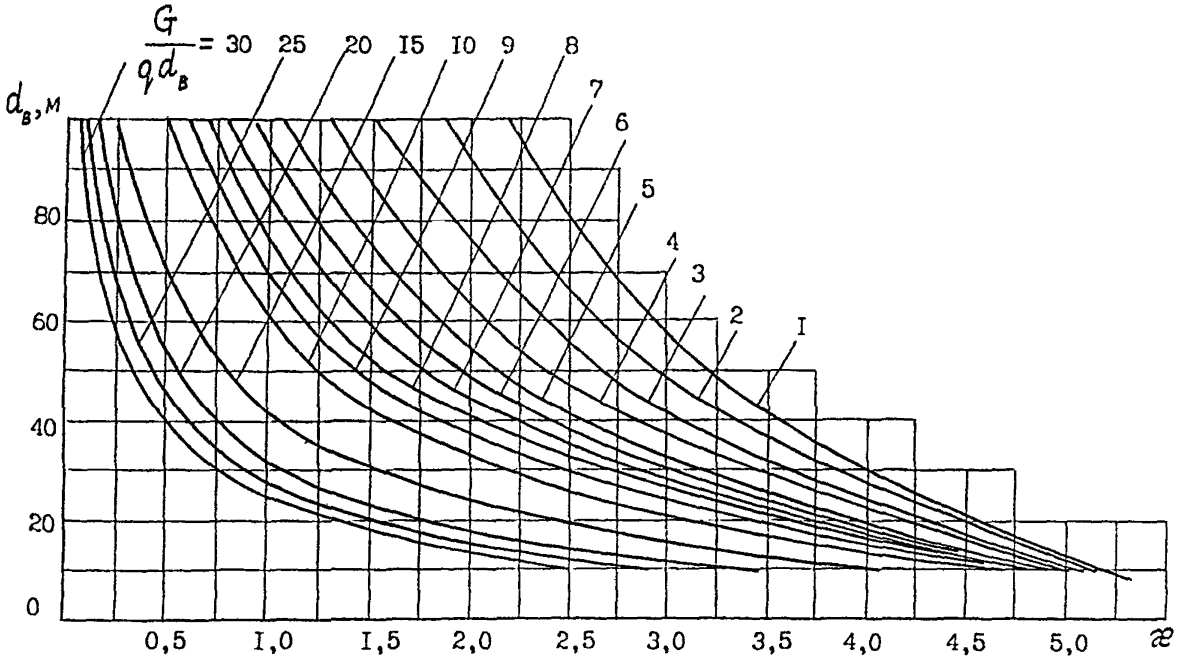


Рисунок 9 - Графики значений коэффициента γ при раскреплении плавучего дока на якорных цепях с грузами и ограничении перемещений корпуса дока $n=0{,}15d_в$

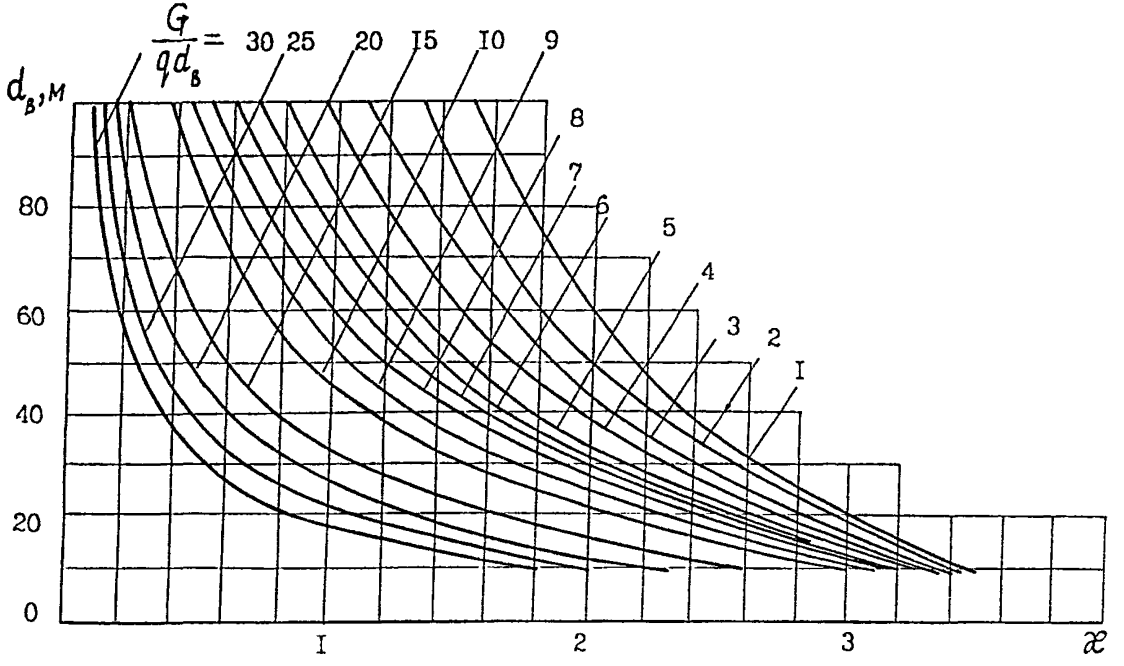


Рисунок 10 - Графики значений коэффициента χ при раскреплении плавучего дока на якорных цепях с грузами и ограничении перемещений корпуса дока $n=0,20d_в$

нагрузок. При разработке проекта раскрепления рейдового причала рекомендуется рассматривать якорные системы:

- на одиночной свободно провисающей якорной связи;
- на одиночной вертикальной якорной связи с одним якорем;
- с многоякорным креплением.

4.6.2 При проектировании установок рейдовых причалов, необходимо учитывать рывковый характер усилий и значительные перемещения швартовных бочек при воздействии ветра, волн, течения и швартовных нагрузок.

4.6.3 Проектирование установок одноточечных рейдовых плавучих причалов для надводных кораблей водоизмещением свыше 20 тыс.тонн должно выполняться в соответствии с инструкцией по проектированию одноточечных рейдовых плавучих причалов для крупных кораблей ВМФ.

5 Указания по расчету якорных систем

5.1 Последовательность расчета якорных систем

5.1.1 Расчет якорных систем плавучих гидротехнических сооружений необходимо производить в следующей последовательности:

- определить внешние расчетные нагрузки, действующие на сооружения;

- на основе компоновочной схемы и действующих на сооружение нагрузок выбрать основные параметры якорной системы: количество, длины и калибры (диаметры) якорных связей, массу подвешенных грузов и места расположения их на связях, условия обтяжки якорных связей (горизонт воды, усилие обтяжки) и т.п.;

- определить распределение нагрузок между отдельными якорными связями при действии на сооружение статических нагрузок и уточнить параметры якорных систем;

- выполнить динамические расчеты плавучего сооружения на якорях;

- оценить динамику якорных связей как элементов якорных систем;

- произвести проверки якорных систем по несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации.

5.2 Нагрузки и воздействия

5.2.1 К постоянным нагрузкам на якорные системы удержания плавучих гидротехнических сооружений относятся нагрузки от веса элементов и усилия от предварительного натяжения якорных связей.

К временным длительным нагрузкам относятся нагрузки, вызываемые изменением уровня моря и осадки плавучего корпуса, нагрузки от течения и давления льда.

К кратковременным нагрузкам относятся нагрузки от ветра, волн и судов (от навала и швартовные).

5.2.2 Нагрузки на плавучие гидротехнические сооружения следует определять для двух случаев эксплуатации:

- рабочее состояние - действуют ветер, течение и волнение с наиболее неблагоприятными параметрами, но допускаемыми в период стоянки кораблей и (или) производства технологических операций на плавучем сооружении;

- штормовой отстой - действуют ветер, течение и волнение с наиболее неблагоприятными параметрами, возможными в районе установки сооружения.

5.2.3 Нагрузки, передаваемые на якорные системы, их сочетания и коэффициенты перегрузки (надежности по нагрузке) следует определять по указаниям СНиП 2.01.07, СНиП 2.06.04, СНиП 2.06.01.

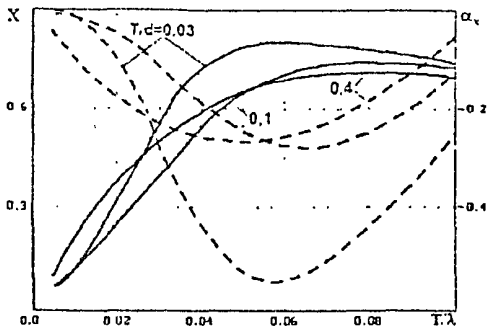
5.2.4 Значения амплитуды горизонтальной P_x, кН, вертикальной P_z, кН, силы и вращающего момента M_y, кНхм, относительно горизонтальной оси сооружения от действия волн на плавучий объект следует определять по формулам

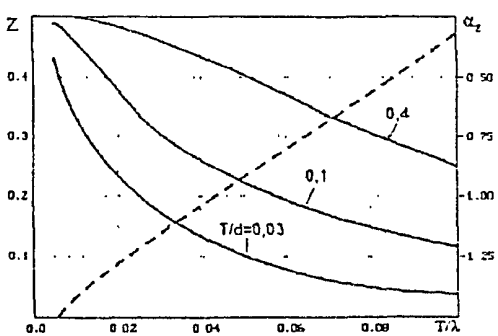
$$P_x = X\rho ghTL; \quad (4)$$

$$P_z = Z\rho ghBL; \quad (5)$$

$$M_y = \frac{M}{4}\rho ghB^2L, \quad (6)$$

где X, Z, M - коэффициенты, принимаемые по графикам на рисунках 11-15 (сплошная линия) в зависимости от отношения осадки T к глубине воды d;





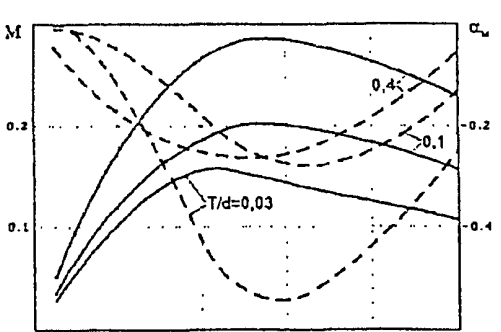


Рисунок 11 - Значения коэффициентов волновой нагрузки X, Z и M и сдвигов по фазе α_x, α_z, α_M при B/T=4

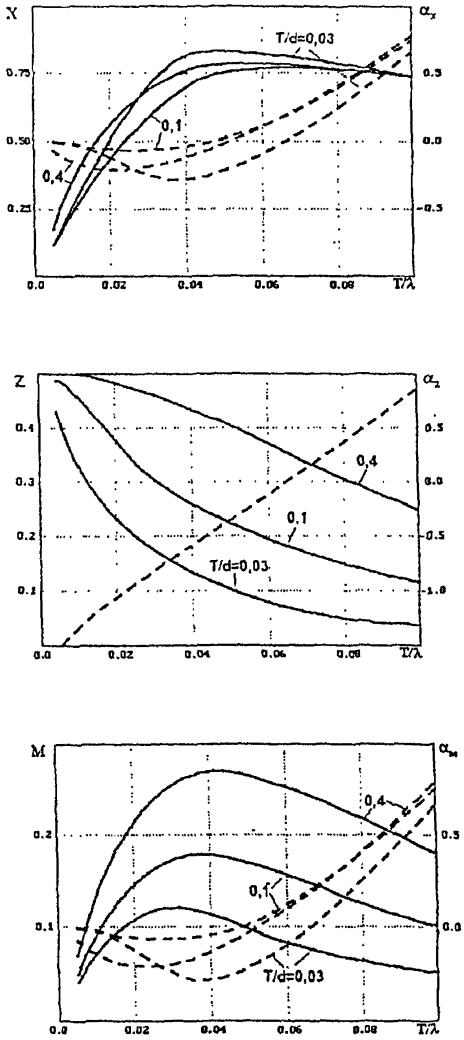


Рисунок 12 - Значения коэффициентов волновой нагрузки X, Z и M и сдвигов по фазе α_x, α_z, α_M при B/T=7

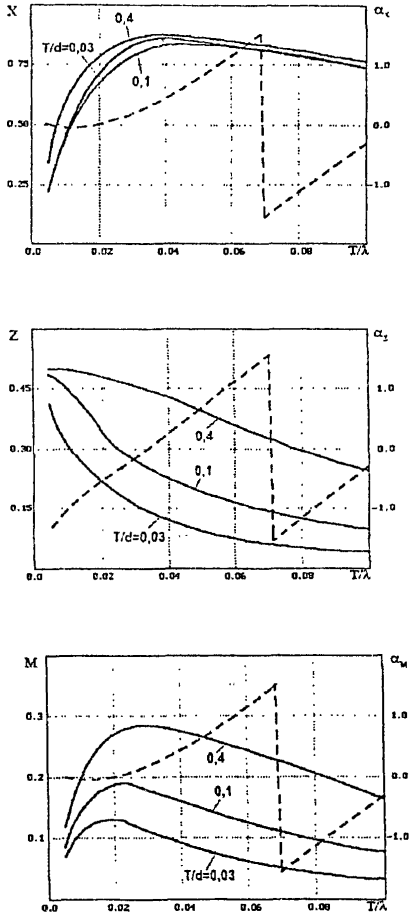


Рисунок 13 - Значения коэффициентов волновой нагрузки X, Z и M и сдвигов по фазе α_x, α_z, $\alpha_м$ при B/T=14

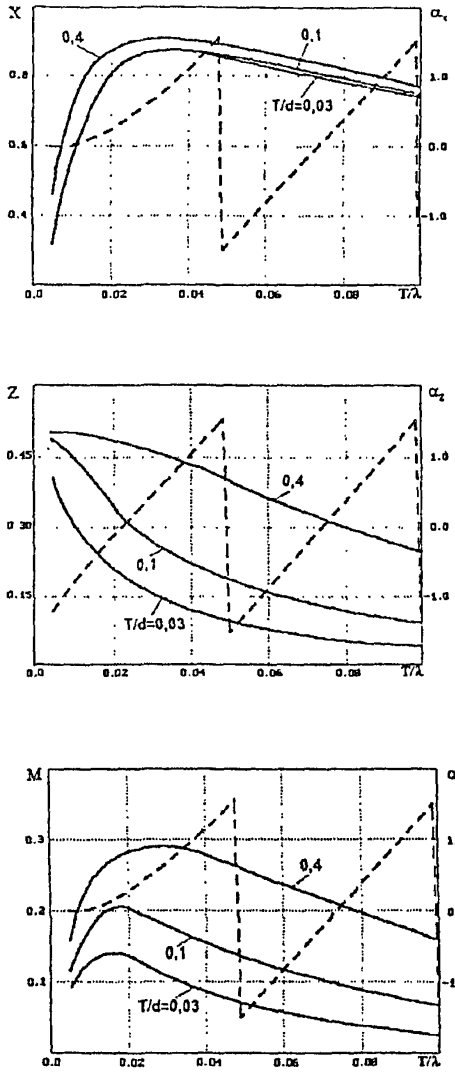
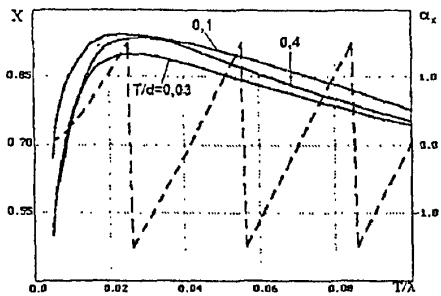
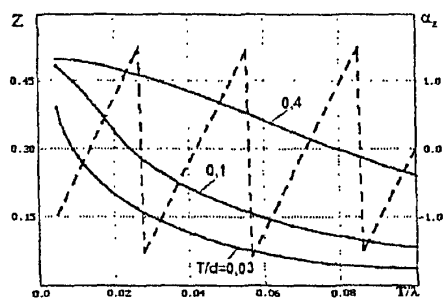


Рисунок 14 - Значения коэффициентов волновой нагрузки X, Z и M и сдвигов по фазе α_x, α_z, $\alpha_м$ при B/T=20





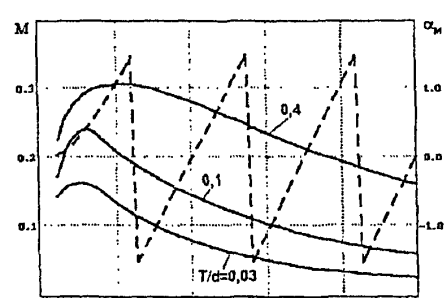


Рисунок 15 - Значения коэффициентов волновой нагрузки X, Z и M и сдвигов по фазе α_x, α_z, α_M при B/T=35

T, B, L - осадка, ширина и длина соответственно плавучего объекта, м;

λ - длина волн, м;

h - высота волн обеспеченностью 5% в системе, м;

ρ - плотность воды, т/м^3;

g - ускорение свободного падения, м/с^2.

Период изменения волновой нагрузки следует принимать равным среднему периоду волн.

5.2.5 Сдвиги по фазе составляющих силы, P_x, P_z, и момента, M_y, α_x, α_z, $\alpha_м$, рад., определяются по графикам на рисунках 11-15 (пунктирная линия) в зависимости от относительной осадки T/λ и T/d. Здесь d - глубина воды.

5.2.6 При учете трехмерности волнения значения нагрузок от действия волн, определяемые в соответствии с 5.2.4 и 5.2.5, допускается уменьшить умножением на коэффициент K_t, принимаемый по таблице 4, в которой обозначено:

- λ - длина волн, м;
- T, B - осадка и ширина сооружения, соответственно, м;
- ε - угол между направлением распространения волн и поперечной (продольной) осью сооружения, рад.

5.2.7 Величины присоединенных масс μ_{xx}, μ_{zz}, кН×с^2×м$^{-1}$, и коэффициентов волнового сопротивления λ_{xx}, λ_{zz}, кН×с×м$^{-1}$, при горизонтальных и вертикальных колебаниях сооружения, а также присоединенного момента инерции $\mu_{\theta\theta}$, кН×с^2×м, и момента сопротивления $\lambda_{\theta\theta}$, кН×с×м, при бортовой качке определяются по формулам

Таблица 4

Значения коэффициента K_t в зависимости от угла подхода волн к сооружению ε и параметров T/λ и B/T										
T/λ		0,03			0,06			0,09		
ε		30°	45°	60°	30°	45°	60°	30°	45°	60°
B/T=4	X	0,92	0,80	0,63	0,96	0,90	0,77	0,99	0,97	0,90
	Z	1,00	0,98	0,94	0,98	0,94	0,85	0,95	0,88	0,78
	a_x	0,93	0,83	0,66	1,07	1,11	1,05	1,62	2,26	2,79
	a_z	0,99	0,97	0,90	1,00	0,98	0,91	1,08	1,19	1,28
B/T=7	X	0,93	0,84	0,67	0,98	0,93	0,82	1,00	0,98	0,92
	Z	0,99	0,96	0,87	0,96	0,89	0,76	0,91	0,83	0,72
	a_x	1,01	0,97	0,83	0,08	-0,85	-1,66	0,70	0,35	-0,04
	a_z	0,98	0,95	0,85	1,05	1,18	1,31	0,76	0,34	-0,18
B/T=14	X	0,96	0,88	0,74	0,99	0,95	0,85	1,01	1,00	0,94
	Z	0,97	0,90	0,76	0,93	0,84	0,70	0,88	0,80	0,68
	a_x	0,53	0,05	0,36	0,82	0,60	0,34	1,64	2,42	-1,46
	a_z	0,96	0,98	0,98	0,89	0,67	0,38	1,45	2,12	-1,27
B/T=20	X	0,96	0,90	0,76	0,99	0,95	0,85	1,01	1,00	0,95
	Z	0,96	0,87	0,72	0,92	0,83	0,70	0,88	0,79	0,67
	a_x	0,79	0,55	0,28	1,44	-1,90	-1,22	0,40	-0,36	-1,33
	a_z	0,95	0,68	0,30	1,26	-1,64	-1,05	0,43	-0,38	-1,41
B/T=35	X	0,97	0,90	0,77	1,00	0,96	0,86	1,02	1,01	0,96
	Z	0,94	0,85	0,70	0,91	0,83	0,69	0,88	0,80	0,68
	a_x	1,22	-1,03	-0,68	-1,08	-0,33	0,64	-0,89	0,49	0,73
	a_z	1,11	-0,89	-0,59	-1,02	-0,31	0,60	-0,85	0,48	-0,70

$$\mu_{xx}=3,14\mu_{22}\rho T^2L; \quad (7)$$

$$\mu_{zz}=0,79\mu_{33}\rho B^2L; \quad (8)$$

$$\mu_{00}=0,2\mu_{44}\rho B^4L; \quad (9)$$

$$\lambda_{xx}=3,14\lambda_{22}\rho\sigma T^2L; \quad (10)$$

$$\lambda_{zz}=0,79\lambda_{33}\rho\sigma B^2L; \quad (11)$$

$$\lambda_{00}=0,2\lambda_{44}\rho\sigma B^4L, \quad (12)$$

где μ_{ii}, λ_{ii} (i=2,3,4) - безразмерные коэффициенты определяются по графикам на рисунках 16-24 в зависимости от T/λ, d/T и B/T;

σ - частота волн, определяемая из уравнения $\sigma=gkth(kd)$;

d - глубина воды, м;

$k=2\pi/\lambda$ - волновое число, $м^{-1}$.

При расчетах якорных систем плавучих причалов допускается не учитывать воздействие волн высотой менее 1 м и длиной менее 20 м, а при расчетах якорных систем плавучих доков допускается не учитывать воздействие волн менее 1,5 м высотой при длине их меньше ширины корпуса дока.

5.3 Указания по методике выполнения расчетов якорных систем

5.3.1 При расчетах якорных систем плавучих гидротехнических сооружений следует рассматривать первоначальное и рабочее состояние:

- первоначальное - до воздействия внешних нагрузок на плавучий объект;
- рабочее - при воздействии внешних расчетных нагрузок.

Расчеты якорных систем должны производиться при самом высоком и самом низком уровнях воды.

Плавучие корпуса сооружений на якорях следует рассматривать как твердые тела, а положения якорей принимать стабилизированными.

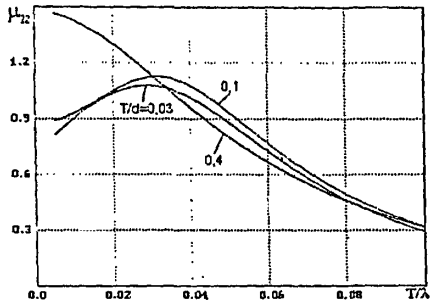
Якорные цепи следует считать тяжелыми, гибкими связями, провисающими по цепным линиям. Массы якорных связей, находящиеся в воде, должны приниматься с учетом взвешивания. Масса единицы длины связи в воде равна массе единицы длины связи в воздухе, умноженной на коэффициент принимаемый:

- для якорных цепей - 0,875;
- для стальных канатов - 0,85.

Масса подвесного груза в воде равна массе подвесного груза в воздухе, умноженного на коэффициент, принимаемый:

- для железобетонного подвесного груза - 0,6;
- для металлического подвесного груза - 0,875.

Соединительные штанги допускается считать в расчетном отношении жесткими или упругими линейно-деформируемыми стержнями, работающими на растяжение и сжатие.



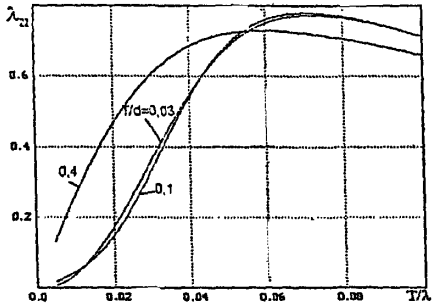


Рисунок 16 - Значения присоединенных масс μ_{22} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{22} при B/T=4

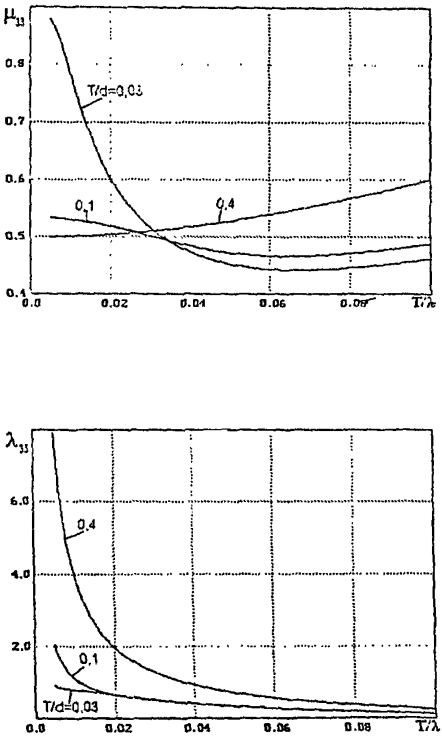


Рисунок 17 - Значения присоединенных масс μ_{33} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{33} при B/T=4

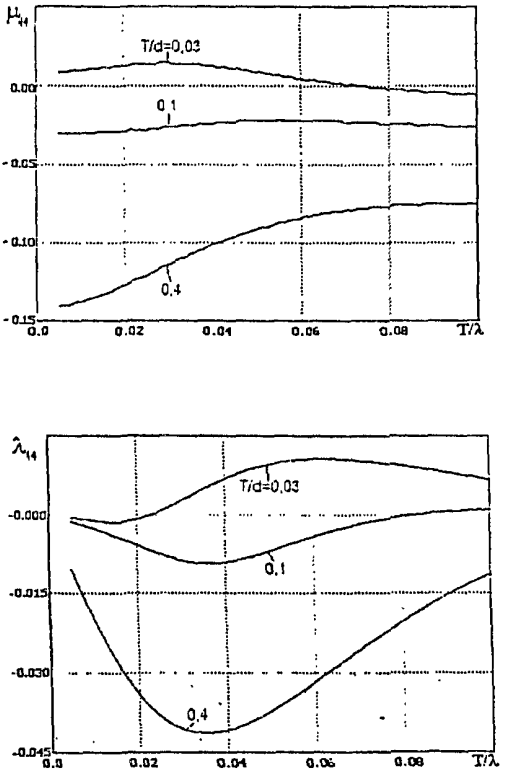


Рисунок 18 - Значения присоединенных масс μ_{44} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{44} при B/T=4

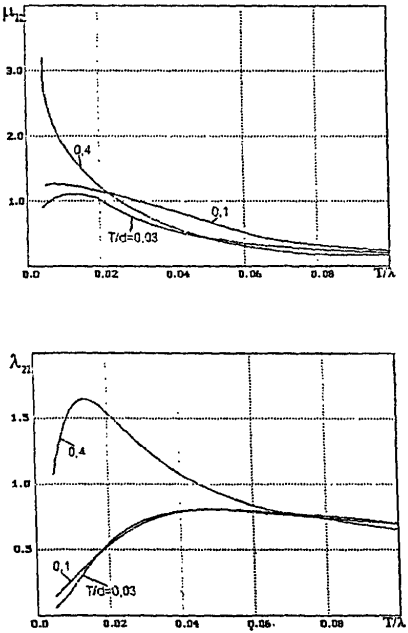


Рисунок 19 - Значения присоединенных масс μ_{22} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{22} при B/T=14

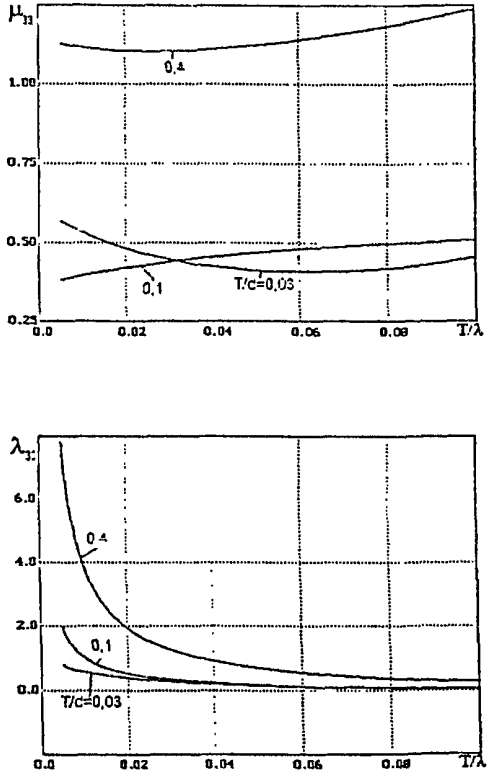


Рисунок 20 - Значения присоединенных масс μ_{33} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{33} при B/T=14

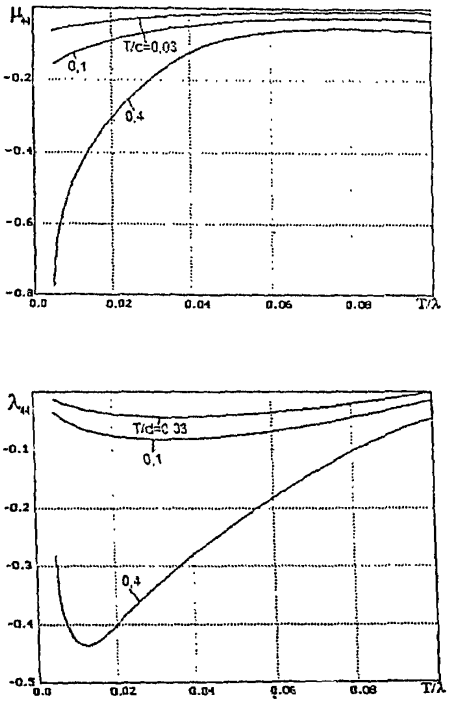


Рисунок 21 - Значения присоединенных масс μ_{44} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{44} при B/T=14

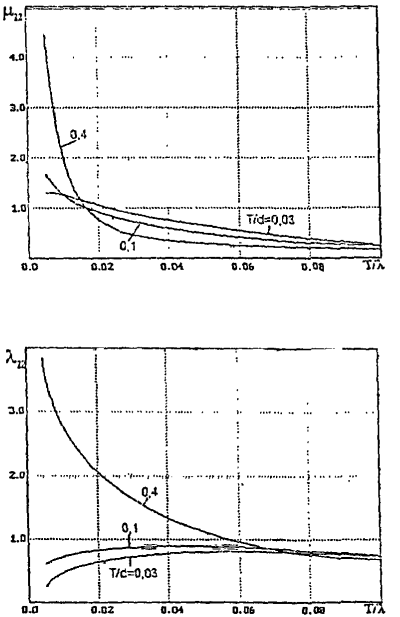


Рисунок 22 - Значения присоединенных масс μ_{22} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{22} при B/T=35

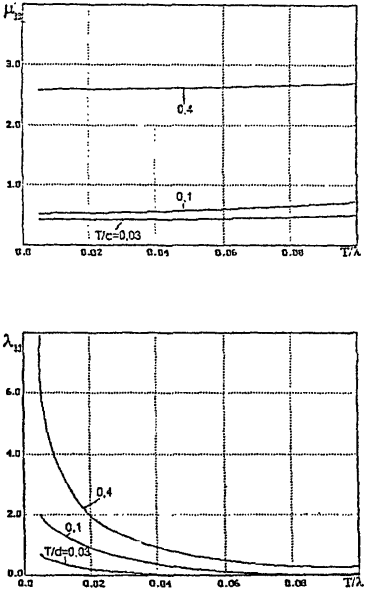


Рисунок 23 - Значения присоединенных масс μ_{33} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{33} при B/T=35

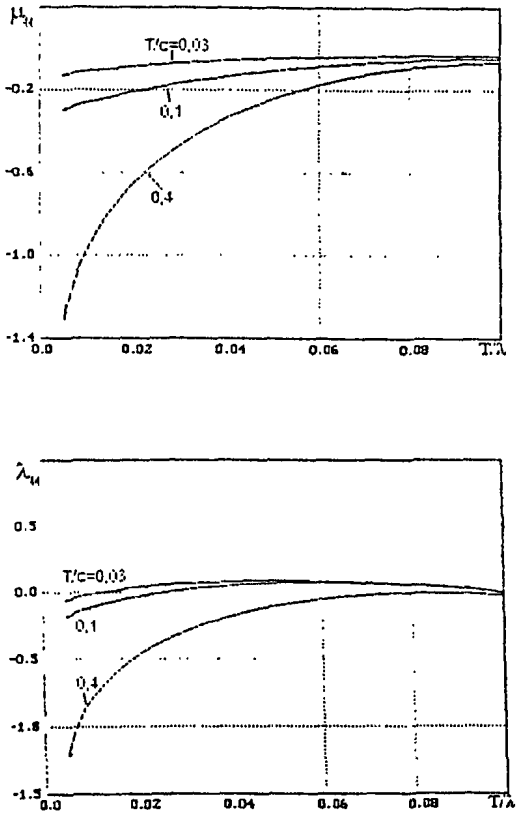


Рисунок 24 - Значения присоединенных масс μ_{44} и коэффициентов волнового сопротивления λ_{44} при B/T=35

5.3.2 Необходимо различать работу якорных связей (цепей, тросов) по схемам "длинных" и "коротких" цепей. Длинной следует считать якорную связь, когда перед якорной опорой имеется лежащий на дне некоторый участок длины связи. При этом на якоря передаются нагрузки по направлениям лежащего на дне участка связи (при горизонтальном дне передаются только горизонтальные нагрузки). Короткой следует считать якорную связь, когда отсутствует лежащий на дне перед якорной опорой участок связи. При этом на якоря передаются горизонтальные и вертикальные нагрузки. Определение схемы работы и выполнение расчетов якорной связи следует производить в соответствии с приложениями Б, В и Г.

5.3.3 Для условий плоских задач необходимо различать:

- симметричные и несимметричные якорные системы;
- передние и тыловые якорные связи (цепи, тросы);
- случаи односторонней и двухсторонней работы якорной системы.

К передним следует относить связи, расположенные со стороны действия внешней силы, в которых при действии внешней силы усилия увеличиваются. В тыловых связях усилия при действии внешней силы уменьшаются.

При односторонней работе следует предполагать, что внешние нагрузки на плавучее сооружение воспринимаются только передними якорными связями, при двухсторонней - нагрузки воспринимаются совместно передними и тыловыми якорными связями.

5.3.4 Якорные системы плавучих гидротехнических сооружений с многоякорным креплением необходимо рассчитывать с учетом планового расположения якорных связей, определять при этом распределение внешней нагрузки между связями. Распределение внешней нагрузки между связями допускается учитывать при помощи коэффициента m неравномерности распределения усилий в связях, полученного на основании специальных исследований или опыта эксплуатации аналогичных сооружений.

Распределение усилий в связях допускается определять в соответствии с приложением Д.

Дальнейшие расчеты каждой связи допускается производить раздельно.

Расчеты якорных систем большинства плавучих сооружений, в том числе причальных, оградительных, плавучих доков, допускается производить в условиях постановок плоских задач и в предположении односторонней работы якорной системы.

5.3.5 Динамические расчеты плавучих сооружений на якорях должны выполняться на действие волновых нагрузок. При этом в дополнение к статическим расчетам следует производить:

- определение свободных колебаний (частот и форм колебаний плавучего объекта на тихой воде);
- определение вынужденных колебаний (перемещений плавучего объекта при действии внешних сил);
- проверку динамической работы на резонанс;
- определение усилий в якорных связях и нагрузок на якоря с учетом динамического характера воздействия;
- другие расчеты, связанные с особенностями плавучих объектов, местных условий.

5.3.6 Динамические расчеты плавучих сооружений на якорях допускается производить в постановках плоских задач в соответствии с приложениями В и Г. Допускается раздельное рассмотрение горизонтальных, вертикальных и вращательных колебаний сооружений. Горизонтальные колебания, обуславливающие наибольшие усилия в якорных связях и нагрузки на якоря, рекомендуется рассчитывать с учетом нелинейной жесткостной характеристики.

5.3.7 При проектировании якорных систем плавучих сооружений необходимо, чтобы значения вынужденных частот действующих расчетных волн и собственных частот колебаний сооружения существенно отличались между

собой, а области возможной работы сооружения на резонансных графиках были удалены от резонансной зоны.

Изменение частот собственных колебаний сооружения на якорях следует достигать изменениями:

- значений первоначального натяжения якорных связей, их массы и массы подвешиваемых грузов;
- мест расположения клюзовых точек и якорных опор;
- введение амортизирующих устройств в якорные системы удержания.

5.3.8 В динамических расчетах плавучих сооружений на якорях следует учитывать инерционное влияние воды и цепных якорных связей на колебания плавучего объекта. Приведенная масса плавучего корпуса сооружения на якорях должна вводиться в расчеты с учетом присоединенных масс воды и цепных якорных связей.

5.3.9 Расчет якорных систем следует производить по двум группам предельных состояний: по несущей способности и непригодности к нормальной эксплуатации.

Расчет по несущей способности включает расчет прочности якорных связей и устойчивости якорей в грунте. При расчете прочности якорных связей в качестве предельно допускаемой нагрузки на якорную цепь должна приниматься пробная нагрузка (ГОСТ 228). Минимальные значения коэффициента запаса прочности k_s (надежности) якорных цепей по отношению к пробной нагрузке следует принимать:

- для плавучих причалов и доков k_s=1,5;
- для плавучих волноломов k_s=2,0.

Расчет устойчивости в грунте якорей гравитационного типа следует производить на опрокидывание и на сдвиг по поверхности грунта. Выбор типа и массы гравитационных якорей должен производиться в соответствии с требованиями действующих нормативных документов (см. приложение А).

Несущую способность по грунту якорных опор других типов следует устанавливать по результатам натурных или лабораторных испытаний. Держащая сила якоря должна приниматься не более 50% от прочности на разрыв якорной связи.

Расчет по непригодности к нормальной эксплуатации заключается в определении перемещений плавучего корпуса, силовых и геометрических характеристик якорных связей и в сравнении полученных значений с допускаемыми.

Приложение А

(справочное)

Перечень нормативных документов, подлежащих учету при проектировании якорных систем плавучих гидротехнических сооружений

1. ГОСТ 228-79 (СТ СЭВ 713-83). Цепи якорные. Общие технические условия.

2. СНиП 2.06.01-86. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования.

3. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

4. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия.

5. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений.

6. СНиП 3.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.

7. Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов.- СПб., 1995г.

8. Инструкция по проектированию одноточечных рейдовых плавучих причалов для крупных кораблей ВМФ: ВСН-17-84/ Минобороны.

9. Инструкция по расчету держащей силы железобетонных якорей и якорных систем рейдовых стоянок/ Минобороны.- М.:Воениздат, 1963г.

10. Правила техниической эксплуатации акваторий и гидротехнических сооружений Военно-морского флота. Приложение к приказу Главнокомандующего ВМФ 1976г. №177.

11. Правила технической эксплуатации плавучих причалов Военно-морского флота. Приложение к приказу Главнокомандующего ВМФ 1972г. №352.

12. Указания по обеспечению долговечности бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений: ВСН 6/118-74/ Минморфлот, Минтрансстрой.

13. Альбом железобетонных и плитовидных якорей весом 10, 15, 20, 25, 30, 40 и 50 тонн.- М.: Воениздат, 1964г.

14. Канаты стальные: ГОСТ 3079-80, ГОСТ 3071-74, ГОСТ 3083-80, ГОСТ 3241-80, ТУ 14-4-944-78, ТУ 14-4-943-78, ОСТ 5.2333-80.

15. Канаты синтетические: ГОСТ 10293-77, ТУ 17-05-003-76, ТУ 17-05-001-76, ТУ 17-05-007-77.

Приложение Б

(рекомендуемое)

Статические расчеты якорных систем в плоской постановке задач

Б.1 Общие положения

В настоящем приложении приведены методы статических расчетов якорных систем, включающих в качестве якорных связей цепи с подвесными грузами и без грузов. Учитывается, что якорная цепь может работать по различным схемам (по схеме "длинных" или "коротких" цепей), каждой из которых соответствуют свои расчетные формулы и зависимости. Расчетные зависимости и очередность вычислений по каждой схеме работы якорной связи приведены по разделам:

- якорные системы с длинными цепями без подвесных грузов или плавучестей - Б.2-4, Б.14-Б.16;
- якорные системы с длинными цепями и с подвесными грузами или плавучестями - Б.5-Б.7, Б.17-Б.19;
- якорные системы с короткими цепями без подвесных грузов или плавучестей - Б.8-Б.10;
- якорные системы с короткими цепями и с подвесными грузами или плавучестями - Б.11-Б.13.

Схемы работы цепи определяются в соответствии с указаниями - Б.20.

Б.2 Якорные системы с длинными цепями без подвесных грузов или плавучестей

При постановке на якоря плавучих сооружений с помощью длинных цепей без подвесных грузов или плавучестей расчеты допускается производить в предположении как односторонней, так и двусторонней

работы якорной системы. В качестве исходных данных для расчета согласно рисунку Б.1 следует принимать величины:

H_1 - горизонтальную составляющую натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

$q, \bar{q}$ - силы тяжести (веса) единицы длины передней и тыловой цепей в воде, кН/м;

$\zeta, \bar{\zeta}$ - вертикальные проекции свободных провисов передней и тыловой цепей, м;

$S, \bar{S}$ - длины передней и тыловой цепей (от клюзов до якорей), м;

$E, \bar{E}$ - модули упругости передней и тыловой цепей, кПа;

$F, \bar{F}$ - площади поперечных сечений общего звена передней и тыловой цепей, м^2.

Б.3 Односторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии расчеты следует производить по приведенным формулам и в той же очередности.

Параметр a_1, м, цепной линии необходимо определять из выражения

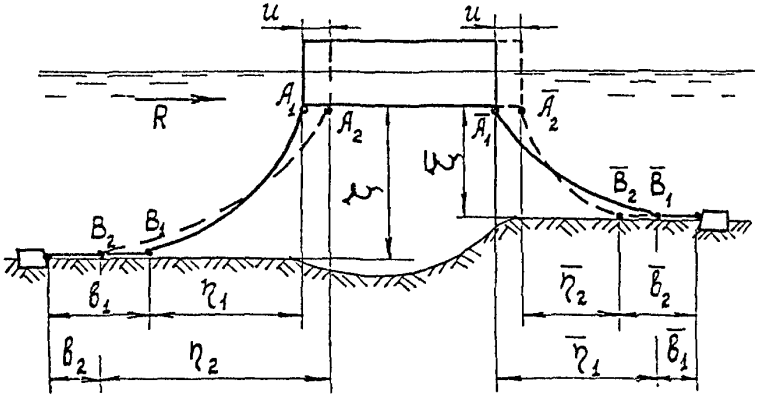
$$a_1 = \frac{H_1}{q} . \qquad (Б.1)$$

Величину η_1^*, м, требуется вычислять по формуле

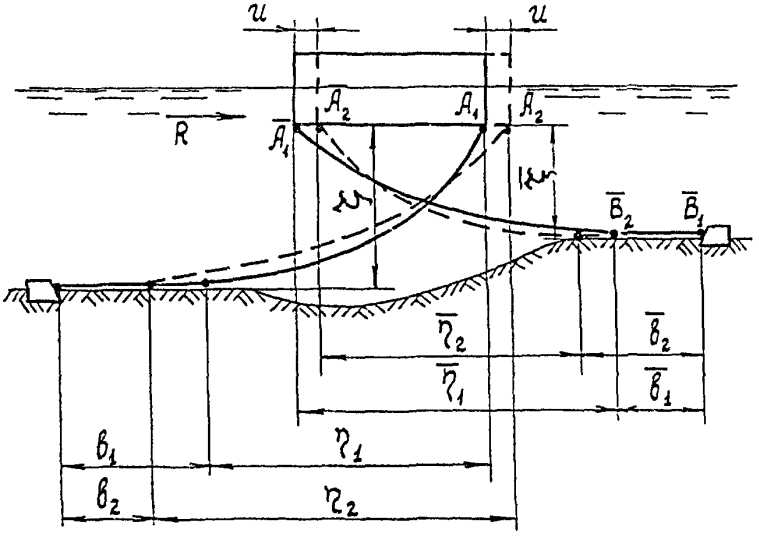
$$\eta_1^* = a_1 \mathrm{Arch}\left(1 + \frac{\zeta}{a_1}\right). \qquad (Б.2)$$

Горизонтальная проекция η_1, м, и длина l_1, м, свободного провиса цепи должны определяться из выражений

а



б



а - обыкновенная (прямая); б - перекрестная (подкильная)

Рисунок Б.1 - Якорные системы с длинными цепями без подвесных грузов и плавучестей

$$\eta_1 = \eta_1^* + \frac{H_1}{EF} a_1 sh \frac{\eta_1^*}{a_1}, \qquad (Б.3)$$

$$l_1 = a_1 sh \frac{\eta_1}{a_1} . \qquad (Б.4)$$

Полное натяжение T_1, кН, цепи в цепной опоре (клюзовой точке) и вертикальная составляющая V_1, кН, этого натяжения должны вычисляться по формулам

$$T_1 = q(a_1 + \zeta), \qquad (Б.5)$$

$$V_1 = ql_1. \qquad (Б.6)$$

В рабочем состоянии горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, (распор в цепи) необходимо вычислять из выражения

$$H_2 = H_1 + R , \qquad (Б.7)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Величины $a_2, \eta_2^*, \eta_2, l_2, T_2, V_2$ надлежит определять по формулам (Б.1)-(Б.6), в которых индекс 1 следует заменить на 2.

Горизонтальное перемещение u, м, сооружения должно находиться из выражения

$$u = \left(a_1 \operatorname{sh}\frac{\eta_1^*}{a_1} - \eta_1^*\right) - \left(a_2 \operatorname{sh}\frac{\eta_2^*}{a_2} - \eta_2^*\right) + \frac{S}{EF}(H_2 - H_1). \qquad (Б.8)$$

Б.4 Двусторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии расчеты для передней и тыловой цепей следует производить раздельно по формулам (Б.1)-(Б.6).

В рабочем состоянии при несимметричной системе удержания параметры $a_2, \bar{a}_2$, м, цепных линий передней и тыловой цепей необходимо вычислять из системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} qa_2 - \bar{q}\bar{a}_2 &= R \\ \sqrt{a_2} + \chi\sqrt{\bar{a}_2} - \sqrt{a_2\bar{a}_2}(a_2\sigma + \bar{a}_2\bar{\sigma}) &= (\chi - \psi)\sqrt{a_2\bar{a}_2} \end{aligned}\right\}, \qquad (Б.9)$$

где $\chi = \dfrac{\zeta\sqrt{\zeta}}{\bar{\zeta}\sqrt{\bar{\zeta}}}$, (Б.10)

$$\sigma = \frac{3qS}{\sqrt{2}\zeta\sqrt{\zeta}EF}, \qquad (Б.11)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{3\bar{q}\bar{S}}{\sqrt{2}\,\bar{\zeta}\sqrt{\bar{\zeta}}EF}, \qquad (Б.12)$$

$$\chi = \frac{\sqrt{a_1} + \chi\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1 \bar{a}_1}}, \qquad (Б.13)$$

$$\psi = a_1\sigma + \bar{a}_1\bar{\sigma}. \qquad (Б.14)$$

Здесь и далее буквенные обозначения с чертой относятся к тыловой цепи.

Горизонтальные нагрузки на якоря $H_2, \bar{H}_2$, кН, должны определяться по формулам

$$H_2 = qa_2, \qquad (Б.15)$$

$$\bar{H}_2 = \bar{q}\bar{a}_2. \qquad (Б.16)$$

В рабочем состоянии характеристики для передней $(\eta_2^*, \eta_2, l_2, T_2, V_2)$ и тыловой $(\bar{\eta}_2^*, \bar{\eta}_2, \bar{l}_2, \bar{T}_2, \bar{V}_2)$ цепей требуется вычислять из выражения (Б.2)-(Б.6), заменив индекс 1 на 2. Горизонтальное перемещение u, м, сооружения следует находить по формуле (Б.8), в которую должны подставляться значения характеристик передней цепи.

При симметричной якорной системе необходимо принимать

$$\begin{aligned} &a_1 = \bar{a}_1;\ \eta_1^* = \bar{\eta}_1^*;\ \eta_1 = \bar{\eta}_1;\ q = \bar{q};\\ &\zeta = \bar{\zeta};\ S = \bar{S};\ E = \bar{E};\ F = \bar{F}. \end{aligned} \qquad (Б.17)$$

Б.5 Якорные системы с длинными цепями и с подвесными грузами или плавучестями

При постановке на якоря плавучих сооружений с помощью длинных цепей с подвесными грузами или плавучестями расчеты допускается производить в предположении односторонней работы якорной системы. В качестве исходных данных для расчета согласно рисунку Б.2 должны приниматься величины:

H - горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

G - сила тяжести (вес) в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести, кН;

q, q* - сила тяжести единицы длины цеп в воде (q - для верхнего участка, выше груза или плавучести, q* - для нижнего участка цепи, ниже груза или плавучести), кН/м;

S_0 - длина верхнего участка цепи (от груза или плавучести до клюза), м;

S* - длина нижнего участка цепи (от груза или плавучести до якоря), м;

ζ - вертикальная проекция свободного провиса цепи, м;

F, F* - площадь поперечного сечения общего звена цепи (F - для верхнего участка цепи; F* - для нижнего участка цепи), $м^2$;

E, E* - модуль упругости цепи (E - для верхнего участка цепи, E* - для нижнего участка), кПа.

Расчет геометрических и силовых характеристик цепи следует производить по приведенным ниже формулам и в той же очередности.

Б.6 Первоначальное состояние якорной системы

Параметры a_1, a_1*, м, цепных линий необходимо вычислять из выражений

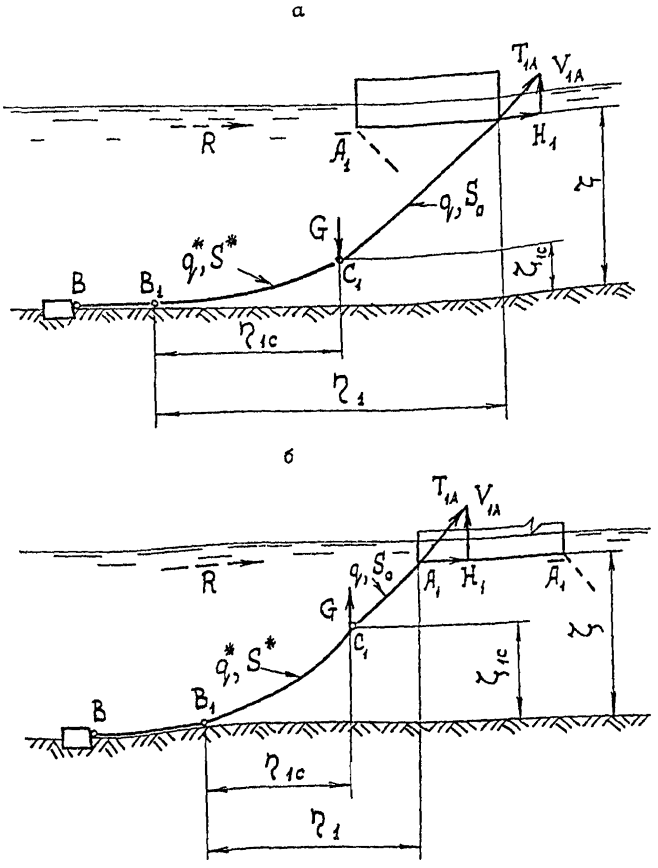


Рисунок Б.2 - Расчетная схема для длинной цепи с подвесным грузом (а) и плавучестью (б)

$$a_1=H_1/q, \qquad (Б.18)$$

$$a_1^*=H_1/q^*. \qquad (Б.19)$$

Величина η_{1c}, м, должна находиться из уравнения

$$1+\frac{\zeta}{a_1^*}=\operatorname{ch}\frac{\eta_{1C}^*}{a_1^*}+\frac{q^*}{q}\left(\operatorname{ch}\frac{x_{1A}}{a_1}-\operatorname{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right), \qquad (Б.20)$$

в котором величины x_{1A}, x_{1C} связаны с η_{1C}^* формулами

$$\frac{x_{1C}}{a_1}=\operatorname{Arsh}\left(\operatorname{sh}\frac{\eta_{1c}^*}{a_1^*}\pm\frac{G}{H}\right), \qquad (Б.21)$$

$$\frac{x_{1A}}{a_1}=\operatorname{Arsh}\left(\frac{S_0}{a_1}+\operatorname{sh}\frac{\eta_{1C}}{a_1^*}\pm\frac{G}{H_1}\right). \qquad (Б.22)$$

Здесь в расчетных формулах перед символом G требуется принимать знак «плюс», если сила G направлена вниз (к цепи подвешен груз). В расчетах якорных цепей с плавучестью (сила G направлена вверх) в формулах перед символом следует принимать знак «минус».

Уравнение (Б.20) включает в себя выражения (Б.21), (Б.22) и должно решаться подбором. Корень его η_{1C}^* графически представляется как абсцисса точки пересечения прямой

$$f_1=1-\zeta/a_1^* \qquad (Б.23)$$

с кривой

$$f_2 = \mathrm{ch}\frac{\eta_{1C}^*}{a_1^*} + \frac{q^*}{q}\left(\mathrm{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \mathrm{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right). \qquad \text{(Б.24)}$$

При подборе необходимо задаваться значениями η_{1C}^*, расчеты вести в табличной форме. В результате решения должны быть определены параметры $\eta_{1C}^*, x_{1A}, x_{1C}$.

Величины η_1^*, l_1^*, м, следует определять по формулам

$$\eta_1^* = \eta_{1c}^* + x_{1A} - x_{1c}, \qquad \text{(Б.25)}$$

$$l_1^* = S_0 + a_1^* \mathrm{sh}(\eta_{1C}^*/a_1^*). \qquad \text{(Б.26)}$$

Горизонтальную η_{1C}, м, и вертикальную ζ_{1C}, м, проекции свободного провиса нижнего участка цепи следует находить из выражений

$$\eta_{1c} = \eta_{1c}^* + \frac{H_1}{E^*F^*} a_1^* \mathrm{sh}\frac{\eta_{1c}^*}{a_1^*}, \qquad \text{(Б.27)}$$

$$\zeta_{1c} = a_1^*\left(\mathrm{ch}\frac{\eta_{1c}}{a_1^*} - 1\right). \qquad \text{(Б.28)}$$

Горизонтальную проекцию η_1, м, и длину l_1, м, свободного провиса всей цепи необходимо вычислять по формулам

$$\eta_1 = \eta_1^* + \frac{H_1}{E^*F^*} a_1^* \mathrm{sh}\frac{\eta_{1c}}{a_1^*} + \frac{H_1 S_0}{EF}, \qquad \text{(Б.29)}$$

$$l_1 = S + a_1^* sh \frac{\eta_{1c}}{a_1^*}. \qquad (Б.30)$$

Полное натяжение T_{1A}, кН, цепи в клюзовой точке и вертикальная составляющая V_{1A}, кН, этого натяжения должны определяться из выражений

$$T_{1A}=H_1 ch(x_{1A}/a_1); \qquad (Б.31)$$

$$V_{1A}=H_1 sh(x_{1A}/a_1). \qquad (Б.32)$$

Полное натяжение T_{1C}^*, кН, цепи нижнего участка в точке крепления груза (плавучести) и вертикальную составляющую V_{1C}^*, кН, требуется находить по формулам

$$T_{1C}^*=H_1 ch(\eta_{1C}^*/a_1^*), \qquad (Б.33)$$

$$V_{1C}^*=H_1 sh(\eta_{1C}^*/a_1^*). \qquad (Б.34)$$

Б.7 Рабочее состояние якорной системы

Горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, следует определять из выражения

$$H_2=H_1+R, \qquad (Б.35)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Геометрические и силовые характеристики якорной цепи необходимо вычислять по формулам (Б.18)-(Б.34), в которых индекс 1 должен быть заменен индексом 2.

Горизонтальное перемещение u, м, плавучего сооружения следует определять из выражения

$$u = \left(l_1^* - \eta_1^*\right) - \left(l_2^* - \eta_2^*\right) + R\left(\frac{S^*}{E^*F^*} + \frac{S_0}{EF}\right). \qquad (Б.36)$$

Б.8 Якорные системы с короткими цепями без подвесных грузов или плавучестей

При постановке на якоря плавучих сооружений с помощью коротких цепей без подвесных грузов или плавучестей расчеты допускается производить в предположении как односторонней, так и двусторонней работы якорной системы. В качестве исходных данных для расчета согласно рисунку Б.3 следует принимать величины:

H_1 - горизонтальную составляющую натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

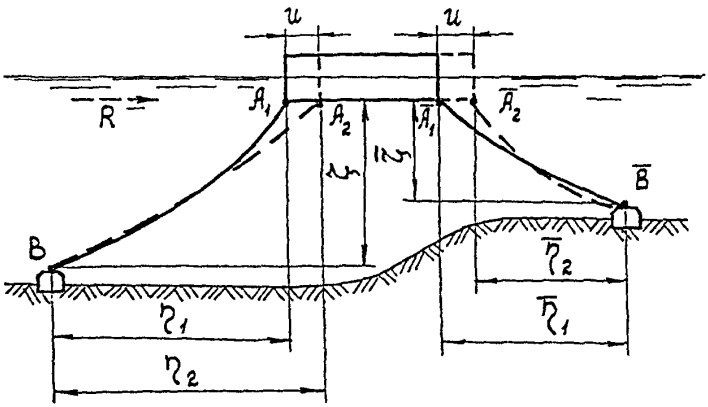
$q, \overline{q}$ - сила тяжести единицы длины передней и тыловой цепей в воде, кН/м;

$\zeta, \overline{\zeta}$ - вертикальные проекции свободных провисов передней и тыловой цепей, м;

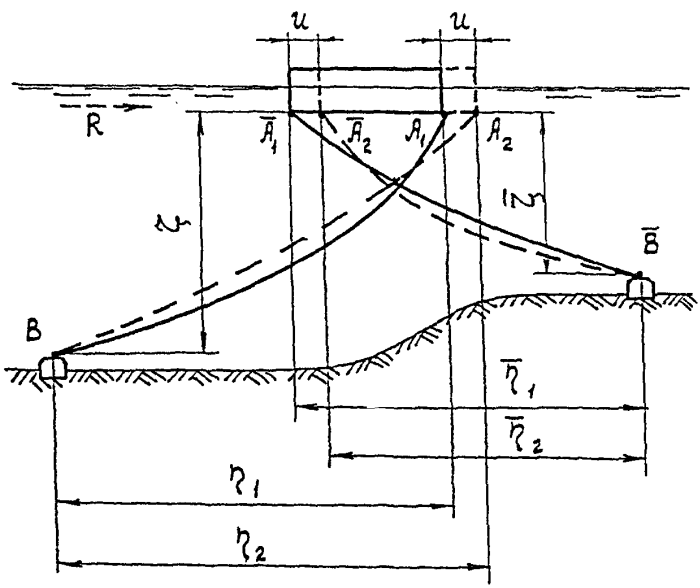
$S, \overline{S}$ - длины передней и тыловой цепей (от клюзов до якорей), м;

$E, \overline{E}$ - модули упругости передней и тыловой цепей, кПа;

$F, \overline{F}$ - площади поперечных сечений общего звена передней и тыловой цепей, м^2.



б



а - обыкновенная (прямая); б - перекрестная (подкильная)

Рисунок Б.3 - Якорные системы с короткими цепями без подвесных грузов или плавучестей

Б.9 Односторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии расчеты следует производить по приведенным ниже формулам и в той же очередности. Параметр a_1, м, цепной линии необходимо определять из выражения

$$a_1=H_1/q \qquad (Б.37)$$

Величины η_1^*, x_{1B}, x_{1A}, м, надлежит вычислять по формулам

$$\eta_1^* = 2a_1 \operatorname{Arsh}\frac{\sqrt{S^2-\zeta^2}}{2a_1}, \qquad (Б.38)$$

$$x_{1B} = a_1 \operatorname{Arth}\frac{\zeta}{S}-\frac{1}{2}\eta_1^*, \qquad (Б.39)$$

$$x_{1A} = x_{1B} + \eta_1^*. \qquad (Б.40)$$

Горизонтальная проекция η_1, м, свободного провиса цепи должна определяться из выражения

$$\eta_1 = \eta_1^* + \frac{H_1 S}{EF}. \qquad (Б.41)$$

В первоначальном состоянии полное натяжение T_{1A}, кН, цепи в цепной опоре (клюзовой точке) и вертикальную составляющую V_{1A}, кН, этого натяжения следует находить по формулам

$$T_{1A}=H_1 \operatorname{ch}(x_{1A}/a_1), \qquad (Б.42)$$

$$V_{1A}=H_1 sh(x_{1A}/a_1). \quad (Б.43)$$

Полное натяжение T_{1B}, кН, цепи в точке крепления к якорю и вертикальная составляющая V_{1B}, кН, усилия на якорь должны определяться из выражений

$$T_{1B}=H_1 ch(x_{1B}/a_1), \quad (Б.44)$$

$$V_{1B}=H_1 sh(x_{1B}/a_1). \quad (Б.45)$$

Горизонтальная составляющая на якорь равна H_1.

В рабочем состоянии горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, (распор в цепи) необходимо вычислять из выражения

$$H_2=H_1+R, \quad (Б.46)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Геометрические и силовые характеристики следует находить по формулам (Б.37)-(Б.45), в которых индекс 1 должен быть заменен индексом 2.

Горизонтальное перемещение сооружения u, м, необходимо определять из выражения

$$u=\eta_2-\eta_1. \quad (Б.47)$$

Б.10 Двусторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии расчеты для передней и тыловой цепей следует производить раздельно по формулам (Б.37)—(Б.45).

В рабочем состоянии при несимметричной системе удержания параметры a_2, $\bar{a}_2$, м, цепных линий передней и тыловой цепей необходимо вычислять из системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} qa_2 - \bar{q}\bar{a}_2 &= R \\ a_2^2 + \chi\bar{a}_2^2 - a_2^2\bar{a}_2^2\left(a_2\sigma + \bar{a}_2\bar{\sigma}\right) &= \left(\chi - \psi\right)a_2^2\bar{a}_2^2 \end{aligned}\right\}, \qquad \text{(Б.48)}$$

где $$\chi = \frac{b^3}{\bar{b}^3}, \qquad \text{(Б.49)}$$

$$b = \frac{1}{2}\sqrt{S^2 - \zeta^2}, \qquad \text{(Б.50)}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{2}\sqrt{\bar{S}^2 - \bar{\zeta}^2}, \qquad \text{(Б.51)}$$

$$\sigma = \frac{3qS}{\bar{b}^3EF}, \qquad \text{(Б.52)}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{3\bar{q}\bar{S}}{\bar{b}^3\bar{E}\bar{F}}, \qquad \text{(Б.53)}$$

$$\chi = \frac{6}{\bar{b}^3}\left[\left(b + \bar{b}\right) - \frac{1}{2}\left(\eta_1^* + \bar{\eta}_1^*\right)\right], \qquad \text{(Б.54)}$$

$$\psi = a_1\sigma + \bar{a}_1\bar{\sigma}. \qquad \text{(Б.55)}$$

Здесь и далее буквенные обозначения с чертой относятся к тыловой цепи.

Горизонтальные нагрузки на якоря $H_2, \overline{H}_2$, кН, должны определяться по формулам

$$H_2 = qa_2. \qquad (Б.56)$$

$$\overline{H}_2 = \overline{q}\overline{a}_2. \qquad (Б.57)$$

В рабочем состоянии геометрические и силовые характеристики для передней и тыловой цепей, а также нагрузки на якоря необходимо вычислять из выражений (Б.38)-(Б.45), в которых индекс 1 должен быть заменен на 2. Горизонтальное перемещение сооружения следует находить по формуле (Б.47), в которую необходимо подставлять значения характеристик передней цепи.

При симметричной якорной системе требуется принимать

$$\begin{aligned} &q = \overline{q};\ \zeta = \overline{\zeta};\ S = \overline{S};\ a_1 = \overline{a}_1; \\ &\eta_1^* = \overline{\eta}_1^*;\ \eta_1 = \overline{\eta}_1;\ E = \overline{E};\ F = \overline{F}. \end{aligned} \qquad (Б.58)$$

Б.11 Якорные системы с короткими цепями и с подвесными грузами или плавучестями

При постановке на якоря плавучих сооружений с помощью коротких цепей с подвесными грузами или плавучестями расчеты допускается производить в предложении односторонней работы якорной системы. В

качестве исходных данных для расчета согласно рисунку Б.4 должны приниматься величины:

H_1 - горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

G - сила тяжести (вес) в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести, кН;

q, q^* - сила тяжести единицы длины цепи в воде (q - для верхнего участка цепи, выше груза или плавучести; q* - для нижнего участка цепи, ниже груза или плавучести), кН/м;

S_0 - длина верхнего участка цепи (от клюза до груза или плавучести), м;

S^* - длина нижнего участка цепи (от груза или плавучести до якоря), м;

ζ - вертикальная проекция свободного провиса цепи, м;

F, F^* - площадь поперечного сечения общего звена цепи (F - для верхнего участка цепи, F* - для нижнего участка цепи), $м^2$;

E, E^* - модуль упругости цепи (E - для верхнего участка, E* - для нижнего участка), кПа.

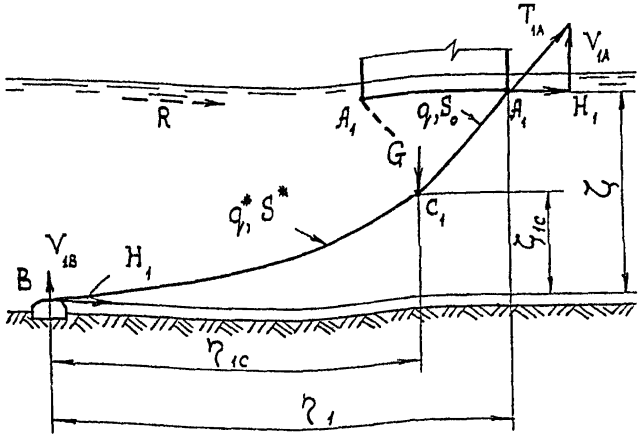
Расчет геометрических и силовых характеристик цепи следует производить по приведенным ниже формулам и в той же очередности.

Б.12 Первоначальное состояние якорной системы

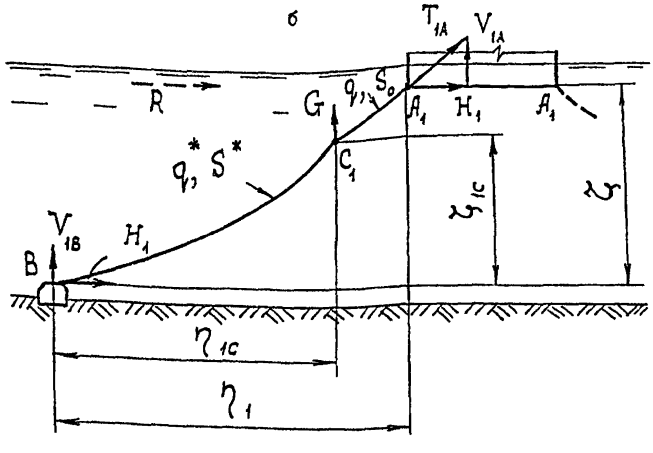
Параметры a_1, a_1^*, м, цепных линий необходимо вычислять из выражений

$$a_1 = \frac{H_1}{q}, \qquad (Б.59)$$

а



б



а - с подвесным грузом; б - с плавучестью

Рисунок Б.4 - Расчетные схемы для короткой цепи

$$a_1^* = \frac{H_1}{q^*}. \qquad (Б.60)$$

Величина x_{1C}^*, м, должна находиться из уравнения

$$\frac{\zeta}{a_1} = \left(\mathrm{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \mathrm{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right) + \frac{q}{q^*}\left(\mathrm{ch}\frac{x_{1C}^*}{a_1^*} - \mathrm{ch}\frac{x_{1B}}{a_1^*}\right), \qquad (Б.61)$$

где величины x_{1A}, x_{1B}^*, x_{1C} связаны с x_{1C}^* соотношениями

$$\frac{x_{1B}^*}{a_1^*} = \mathrm{Arsh}\left(\mathrm{sh}\frac{x_{1C}^*}{a_1^*} - \frac{S^*}{a_1^*}\right), \qquad (Б.62)$$

$$\frac{x_{1C}}{a_1} = \mathrm{Arsh}\left(\mathrm{sh}\frac{x_{1C}^*}{a_1^*} \pm \frac{G}{H_1}\right), \qquad (Б.63)$$

$$\frac{x_{1A}}{a_1} = \mathrm{Arsh}\left(\mathrm{sh}\frac{x_{1C}^*}{a_1^*} \pm \frac{G}{H_1} + \frac{S_0}{a_1}\right). \qquad (Б.64)$$

Здесь знак "плюс" перед символом G следует принимать при расчетах якорных цепей с подвесными грузами, а знак "минус" - для цепей с плавучестями.

Уравнение (Б.61) необходимо решать подбором. Корень его x_{1C}^* графически представляется как абсцисса точки пересечения прямой f_1 с кривой f_2, уравнения которых представлены соотношениями

$$f_1 = \frac{\zeta}{a_1}, \qquad (Б.65)$$

$$f_2 = \left(\mathrm{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \mathrm{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right) + \frac{q}{q^*}\left(\mathrm{ch}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - \mathrm{ch}\frac{x_{1B}}{a^*_1}\right). \qquad (Б.66)$$

При подборе необходимо задаваться значениями x^*_{1C}, расчеты вести в табличной форме. В результате решения должны быть определены параметры x^*_{1C}, x^*_{1B}, x_{1C}, x_{1A}.

Величины η^*_{1C}, η^*_1, м, надлежит вычислять по формулам

$$\eta^*_{1.} = x^*_{1C} - x^*_{1B}, \qquad (Б.67)$$

$$\eta^*_1 = x_{1A} - x_{1C} + x^*_{1C} - x^*_{1B}. \qquad (Б.68)$$

Горизонтальную η_{1C}, м, и вертикальную ζ_{1C}, м, проекции свободного провиса нижнего участка цепи следует находить из выражения

$$\eta_{1.} = \eta^*_{1C} + \frac{H_1 S^*}{E^* F^*}, \qquad (Б.69)$$

$$\zeta_{1C} = a^*_1\left(\mathrm{ch}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - \mathrm{ch}\frac{x^*_{1B}}{a^*_1}\right). \qquad (Б.70)$$

Горизонтальную проекцию η_1, м, свободного провиса всей цепи необходимо вычислять по формуле

$$\eta_1 = \eta^*_1 + \frac{H_1 S^*}{E^* F^*} + \frac{H_1 S_0}{EF}. \qquad (Б.71)$$

Полное натяжение T_{1A}, кН, и вертикальная составляющая V_{1A}, кН, усилия в цепной опоре должны определяться из выражений

$$T_{1A} = H_1 ch \frac{x_{1A}}{a_1}, \qquad (Б.72)$$

$$V_{1A} = H_1 sh \frac{x_{1A}}{a_1}. \qquad (Б.73)$$

Полное натяжение T^*_{1C}, кН, цепи нижнего участка в точке крепления груза (плавучести) и вертикальную составляющую V^*_{1C}, кН, требуется находить по формулам

$$T^*_{1C} = H_1 ch \frac{x^*_{1C}}{a^*_1}, \qquad (Б.74).$$

$$V^*_{1C} = H_1 sh \frac{x^*_{1C}}{a^*_1}. \qquad (Б.75)$$

Полное натяжение T_{1B}, кН, цепи в точке крепления к якорю и вертикальную составляющую V_{1B}, кН, усилия на якорь следует вычислять из выражений

$$T_{1B} = H_1 ch \frac{x^*_{1B}}{a^*_1}, \qquad (Б.76)$$

$$V_{1B} = H_1 sh \frac{x^*_{1B}}{a^*_1}. \qquad (Б.77)$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь равна H_1.

Б.13 Рабочее состояние якорной системы

Горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, необходимо определять по формуле

$$H_2 = H_1 + R, \qquad (Б.78)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Геометрические и силовые характеристики якорной цепи должны вычисляться по формулам (Б.59)-(Б.77), в которых индекс I следует заменить на 2.

Горизонтальное перемещение плавучего сооружения u, м, надлежит определять из выражения

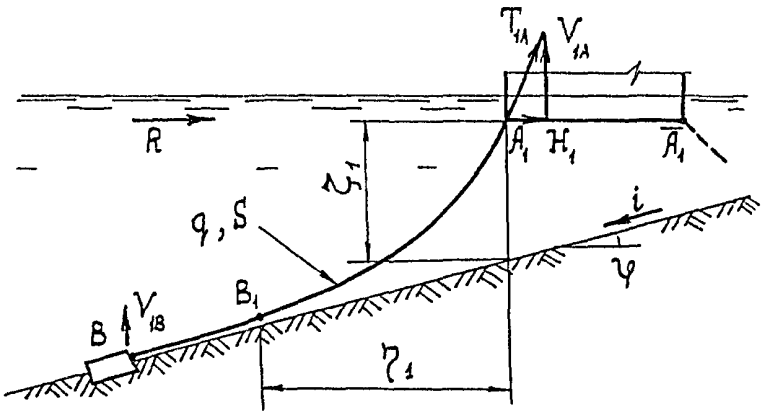
$$u = \eta_2 - \eta_1. \qquad (Б.79)$$

Б.14 Якорные системы с длинными цепями без подвесных грузов или плавучестей при наклонном дне

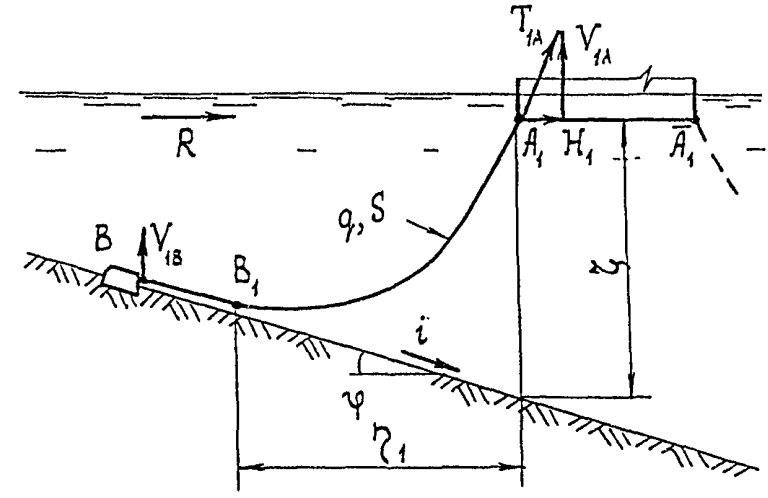
При значениях изменения глубины (разницы глубин воды у клюза и якоря) к горизонтальной проекции цепи больше 0,02, расчеты якорных систем рекомендуется выполнять с учетом наклона дна акватории.

При постановке на якорь плавучих сооружений с помощью длинных цепей без подвесных грузов или плавучестей при наклонном дне расчеты допускается производить в предположении односторонней работы якорной системы. В качестве исходных данных для расчета согласно рисунку Б.5 должны приниматься величины:

а



б



а - при прямом уклоне дна; б - при обратном уклоне дна

Рисунок Б.5 - Расчетные схемы для длинной цепи без подвесных грузов или плавучестей

H_1 - горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

q - сила тяжести единицы длины цепи в воде, кН/м;

ζ_1 - возвышение клюзовой точки над поверхностью дна в первоначальном состоянии, м;

S - длина цепи (от клюза до якоря), м;

E - модуль упругости цепи, кПа;

F - площадь поперечного сечения общего звена цепи, $м^2$;

i - уклон дна, $i=tg\varphi$, φ -угол наклона (при прямом уклоне дна значения i в расчетных формулах необходимо принимать со знаком плюс; при обратном уклоне - со знаком минус).

Расчет геометрических и силовых характеристик цепи следует производить по приведенным ниже формулам и в той же очередности.

Б.15 Первоначальное состояние якорной системы

Параметр a_1, м, цепной линии необходимо вычислять из выражения

$$a_1 = \frac{H_1}{q} . \qquad (Б.80)$$

Величина x_{1A}, м, находится из уравнения

$$\frac{\zeta_1}{a_1} = \left(ch\frac{x_{1A}}{a_1} - \sqrt{1+i^2} \right) - \frac{i}{a_1}(x_{1A} - x_{1B}) - \frac{i}{a_1}\frac{H_1 S}{EF} , \qquad (Б.81)$$

где $x_{1B} = a_1 Arsh(i)$. (Б.82)

Уравнение (Б.81) следует решать подбором. Корень его графически представляется как абсцисса точки пересечения прямой f_1 с кривой f_2, уравнения которых представлены соотношениями

$$f_1 = \frac{\zeta_1}{a_1}, \qquad \text{(Б.83)}$$

$$f_2 = \left(\operatorname{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \sqrt{1+i^2}\right) - \frac{i}{a_1}\left(x_{1A} - x_{1B}\right) - \frac{i}{a_1}\frac{H_1 S}{EF}. \qquad \text{(Б.84)}$$

Величину η_1^*, м, следует вычислять по формуле

$$\eta_1^* = x_{1A} - x_{1B}. \qquad \text{(Б.85)}$$

Горизонтальную проекцию η_1, м, длину l_1, м, свободного провиса цепи необходимо находить из выражений

$$\eta_1 = \eta_1^* + \frac{a_1 H_1}{EF}\left(\operatorname{sh}\frac{x_{1A}}{a_1} - i\right), \qquad \text{(Б.86)}$$

$$l_1 = a_1\left(\operatorname{sh}\frac{x_{1A}}{a_1} - i\right). \qquad \text{(Б.87)}$$

Полное натяжение T_{1A}, кН, цепи в клюзовой точке и вертикальная составляющая V_{1A}, кН, этого натяжения должны вычисляться по формулам

$$T_{1A} = H_1 ch\frac{x_{1A}}{a_1}, \qquad (Б.88)$$

$$V_{1A} = H_1 sh\frac{x_{1A}}{a_1}. \qquad (Б.89)$$

Вертикальную составляющую V_{1B}, кН, усилия на якорь надлежит определять из выражения

$$V_{1B} = iH_1. \qquad (Б.90)$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь равна H_1.

Б.16 Рабочее состояние якорной системы

Горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, (распор в цепи) следует вычислять по формуле

$$H_2=H_1+R, \qquad (Б.91)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Параметр x_{2A} необходимо находить из выражения

$$x_{2A} = a_2 Arsh\left\{\sqrt{\left[\frac{\zeta_1}{a_2}+\frac{i}{a_2}\left(\eta_1^* - \frac{l_1}{\sqrt{1+i^2}}+\frac{H_1 S}{EF}\right)+\frac{1}{\sqrt{1+i^2}}\right]^2 - \frac{1}{1+i^2}} + i\sqrt{1+i^2}\left[\frac{\zeta_1}{a_2}+\frac{i}{a_2}\left(\eta_1^* - \frac{l_1}{\sqrt{1+i^2}}+\frac{H_1 S}{EF}\right)+\frac{1}{\sqrt{1+i^2}}\right]\right\}. \qquad (Б.92)$$

Геометрические и силовые характеристики цепи должны определяться из выражений (Б.80), (Б.82)-(Б.90), в которых индекс 1 требуется заменить индексом 2.

Перемещение плавучего сооружения u, м, следует вычислять по формуле

$$u = \left(\eta_2^* - \eta_1^*\right) - \frac{\left(l_2 - l_1\right)}{\sqrt{1+i^2}} + \frac{SR}{EF}. \qquad (Б.93)$$

Б.17 Якорные системы с длинными цепями и с подвесными грузами или плавучестями при наклонном дне

При постановке на якоря плавучих сооружений с помощью длинных цепей с подвесными грузами или плавучестями при наклонном дне расчеты допускается производить в предположении односторонней работы якорной системы. В качестве исходных данных для расчета согласно рисункам Б.6, Б.7 должны приниматься величины:

H_1 - горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор), кН;

G - сила тяжести в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести, кН;

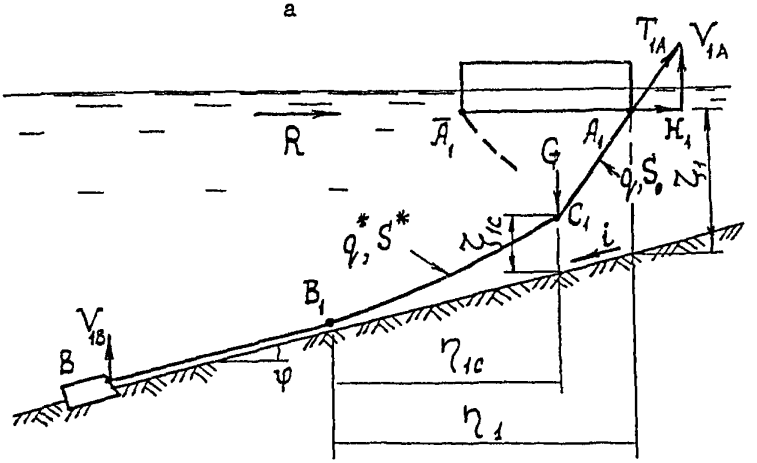
q, q* - сила тяжести единицы длины цепи в воде (q - для верхнего участка цепи, выше груза или плавучести, q* - для нижнего участка цепи, ниже груза и плавучести), кН/м;

S_0 - длина верхнего участка цепи (от груза или плавучести до клюза), м;

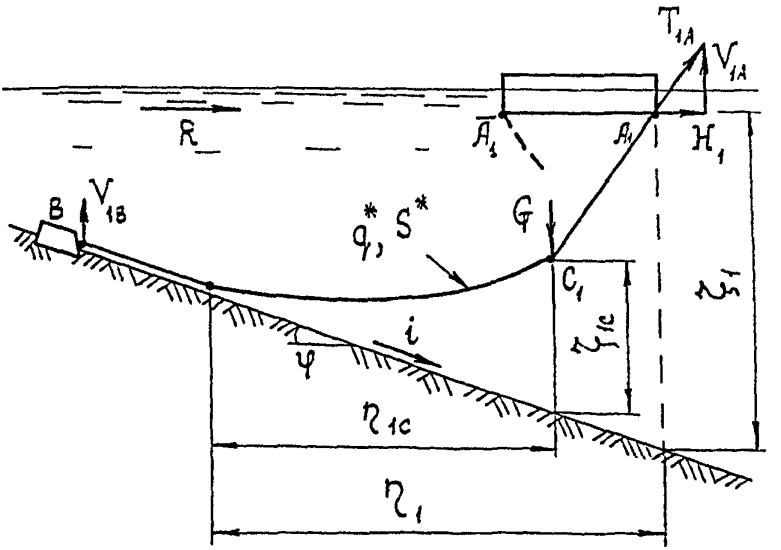
S* - длина нижнего участка цепи (от якоря до груза или плавучести), м;

ζ_1 - возвышение клюзовой точки над поверхностью дна в первоначальном состоянии, м

а

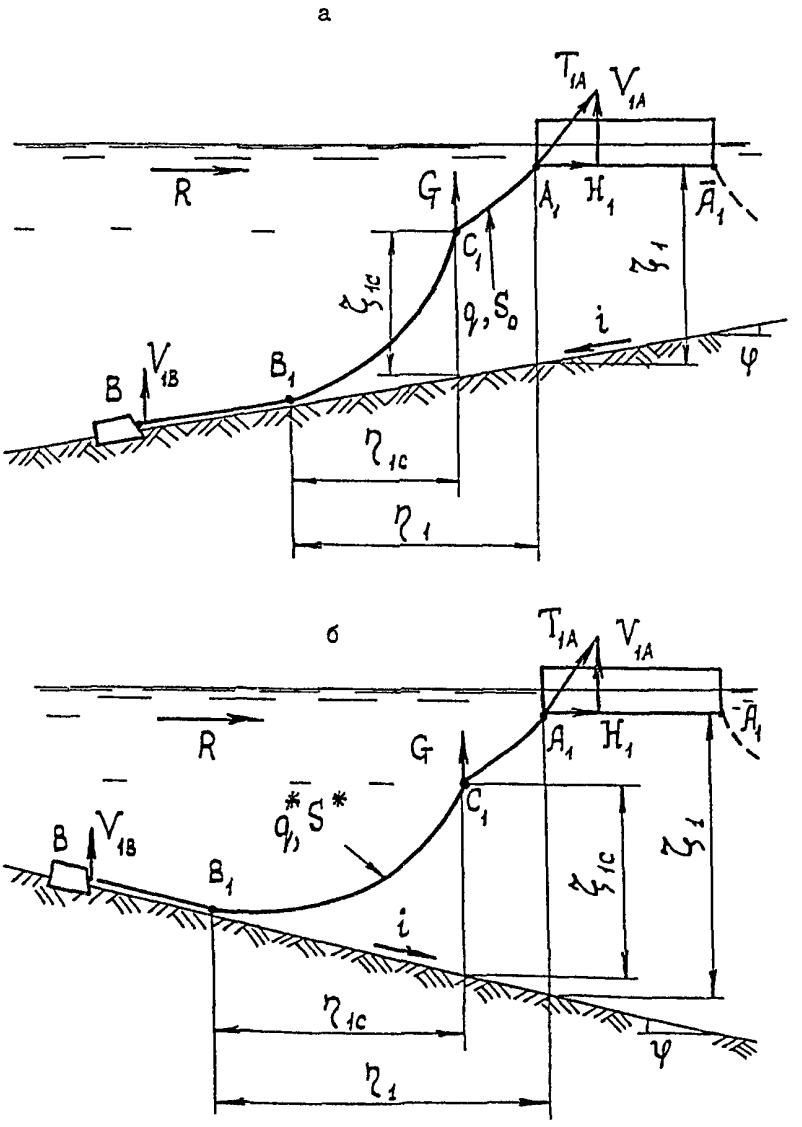


б



а - при прямом уклоне дна; б - при обратном уклоне дна

Рисунок Б.6 - Расчетные схемы для длинной цепи с подвесным грузом



а - при прямом уклоне дна; б - при обратном уклоне дна

Рисунок Б.7 - Расчетные схемы для длинной цепи с плавучестью

i - уклон дна, i=tgφ, φ - угол наклона (при прямом уклоне дна значения i в расчетных формулах следует принимать со знаком "плюс"; при обратном уклоне - со знаком "минус");

F, F*- площадь поперечного сечения общего звена цепи (F - для верхнего участка цепи; F* -для нижнего участка цепи), м^2;

E, E*- модуль упругости цепи (E - для верхнего участка, E* - для нижнего участка), кПа.

Расчеты геометрических и силовых характеристик цепи необходимо производить по приведенным ниже формулам и в той же очередности.

Б.18 Первоначальное состояние якорной системы

Параметры a_1, a_1^*, м, цепных линий должны определяться из выражений

$$a_1 = \frac{H_1}{q}, \qquad (Б.94)$$

$$a_1^* = \frac{H_1}{q^*}. \qquad (Б.95)$$

Величину x_{1C}^*, м, следует находить из уравнения

$$\frac{\zeta_1}{a_1} = \left(\operatorname{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \operatorname{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right) + \frac{q}{q^*}\left(\operatorname{ch}\frac{x_{1C}^*}{a_1^*} - \sqrt{1+i^2}\right) - \\ - \frac{i}{a_1}\left(x_{1A} - x_{1C} + x_{1C}^* - x_{1B}^*\right) - \frac{i}{a_1}\left(\frac{S^*}{E^*F^*} + \frac{S_0}{EF}\right)H_1, \qquad (Б.96)$$

где величины x_{1C}, x_{1A} связаны с x_{1C}^* соотношениями

$$\frac{x_{1C}}{a_1} = \mathrm{Arsh}\left(\mathrm{sh}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} \pm \frac{G}{H_1}\right), \qquad (Б.97)$$

$$\frac{x_{1A}}{a_1} = \mathrm{Arsh}\left(\mathrm{sh}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} + \frac{S_0}{a_1} \pm \frac{G}{H_1}\right), \qquad (Б.98)$$

параметр x^*_{1B} необходимо вычислять по формуле

$$x^*_{1B} = a^*_1 \mathrm{Arsh}(i). \qquad (Б.99)$$

Здесь и далее в расчетных формулах перед символом G требуется принимать знак "плюс", если сила G направлена вниз (к цепи подвешен груз). В расчетах якорных цепей с плавучестью (сила G направлена вверх) в формулах перед символом G следует принимать знак "минус".

Уравнение (Б.96) включает в себя выражения (Б.97)-(Б.99) и должно решаться подбором. Корень его x^*_{1C} графически представляется как абсцисса точки пересечения прямой f_1 с кривой f_2, уравнения которых представлены соотношениями

$$f_1 = \frac{\zeta_1}{a_1}, \qquad (Б.100)$$

$$f_2 = \left(\mathrm{ch}\frac{x_{1A}}{a_1} - \mathrm{ch}\frac{x_{1C}}{a_1}\right) + \frac{q}{q^*}\left(\mathrm{ch}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - \sqrt{1+i^2}\right) - \\ - \frac{i}{a_1}\left(x_{1A} - x_{1C} + x^*_{1C} - x^*_{1B}\right) - \frac{i}{a_1}\left(\frac{S^*}{E^*F^*} + \frac{S_0}{EF}\right)H_1 . \qquad (Б.101)$$

При подборе необходимо задаваться значениями x^*_{1C}, расчеты вести в табличной форме. В результате решения должны быть определены параметры $x^*_{1C}, x_{1A}, x_{1C}, x^*_{1B}$.

Величины η^*_{1C}, η^*_1, м, необходимо вычислять по формулам

$$\eta^*_{1_*} = x^*_{1C} - x^*_{1B}, \qquad \text{(Б.102)}$$

$$\eta^*_1 = x_{1A} - x_{1C} + x^*_{1C} - x^*_{1B}. \qquad \text{(Б.103)}$$

Горизонтальную η_{1C}, м, и вертикальную ζ_{1C}, м, проекции свободного провиса нижнего участка цепи следует находить из выражений

$$\eta_{1C} = \eta^*_{1C} + \frac{H_1 a^*_1}{E^* F^*}\left(\operatorname{sh}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - i\right), \qquad \text{(Б.104)}$$

$$\zeta_{1C} = a^*_1\left(\operatorname{ch}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - \sqrt{1+i^2}\right) - i\left(\eta^*_{1C} + \frac{H_1 S^*}{E^* F^*}\right). \qquad \text{(Б.105)}$$

Горизонтальную проекцию η_1, м, и длину l_1, м, свободного провиса всей цепи необходимо вычислять по формулам

$$\eta_1 = \eta^*_{1C} + \frac{H_1 a^*_1}{E^* F^*}\left(\operatorname{sh}\frac{x^*_{1C}}{a^*_1} - i\right) + \frac{H_1 S_o}{EF}, \qquad \text{(Б.106)}$$

$$l_1 = S_o + a^*_1\left(\operatorname{sh}\frac{x_{1C}}{a^*_1} - i\right). \qquad \text{(Б.107)}$$

Полное натяжение T_{1A}, кН, цепи в цепной опоре и вертикальная составляющая V_{1A}, кН, этого натяжения должны определяться из выражений

$$T_{1A} = H_1 ch \frac{x_{1A}}{a_1}, \qquad (Б.108)$$

$$V_{1A} = H_1 sh \frac{x_{1A}}{a_1}. \qquad (Б.109)$$

Полное натяжение T^*_{1C}, кН, цепи нижнего участка в точке крепления груза (плавучести) и вертикальную составляющую V^*_{1C}, кН, требуется находить по формулам

$$T^*_{1c} = H_1 ch \frac{x^*_{1c}}{a^*_1}, \qquad (Б.110)$$

$$V^*_{1c} = H_1 sh \frac{x^*_{1c}}{a^*_1}. \qquad (Б.111)$$

Вертикальную составляющую V_{1B}, кН, усилия на якорь следует вычислять из выражения

$$V_{1B}=iH_1 . \qquad (Б.112)$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь равна H_1.

Б.19 Рабочее состояние якорной системы

Горизонтальную нагрузку на якорь H_2, кН, (распор в цепи) следует вычислять по формуле

$$H_2=H_1+R\,, \qquad (Б.113)$$

где R - внешняя сила, кН, действующая на выделенный для расчета участок плавучего сооружения.

Параметр x^*_{2C} необходимо находить из выражения

$$\frac{\zeta_1}{a_2}+\frac{i}{a_2}\eta_1^*-\frac{i(l_1-S_0)}{a_2\sqrt{1+i^2}}=\left(ch\frac{x_{2A}}{a_2}-ch\frac{x_{2C}}{a_2}\right)+\frac{q}{q^*}\times$$
$$\times\left[\left(ch\frac{x^*_{2C}}{a_2^*}-\sqrt{1+i^2}\right)-\frac{i}{\sqrt{1+i^2}}\left(sh\frac{x^*_{2C}}{a_2^*}-i\right)\right]-\frac{i}{a_2}\left(\frac{S^*}{E^*F^*}+\frac{S_0}{EF}\right)H_1\,, \qquad (Б.114)$$

где величины x_{2A}, x_{2C} связаны с x^*_{2C} соотношениями (Б.97), (Б.98), в которых индекс 1 следует заменить на 2; параметры a_2, a_2^* необходимо вычислять по формулам (Б.94), (Б.95).

Геометрические и силовые характеристики цепи должны определяться по формулам (Б.99), (Б.102)-(Б.112) с заменой индекса 1 и 2.

Горизонтальное перемещение u, м, плавучего сооружения следует вычислять из выражения

$$u=\left(\eta_2^*-\eta_1^*\right)-\frac{(l_2-l_1)}{\sqrt{1+i^2}}+\left(\frac{S^*}{E^*F^*}+\frac{S_0}{EF}\right)R\,. \qquad (Б.115)$$

Б.20 Определение усилий, соответствующих переходу работы якорной цепи от одной расчетной схемы к другой

Якорная цепь без подвесного груза в расчетном отношении может работать как длинная или как короткая. Значения горизонтальной составляющей натяжения H_{1k}, кН, цепи, соответствующие переходу от схемы длинной цепи к короткой, следует определять по формулам

при ровном дне (обозначения по Б.2)

$$H_{1k} = \frac{q\left(S^2 - \zeta^2\right)}{2\zeta}, \qquad (Б.116)$$

при наклонном дне (обозначения по Б.14)

$$H_{1k} = \frac{q\left(S^2 - \zeta_{AB}^2\right)}{2\left(\zeta_{AB}\sqrt{1+i^2} - iS\right)}, \qquad (Б.117)$$

где ζ_{AB} возвышение клюзовой точки над точкой крепления цепи к якорю, м, значение которого следует вычислять по формуле

$$\zeta_{AB} = \zeta_1 + i\left[\eta_1 + \left(S - l_1\right)\frac{1}{\sqrt{1+i^2}} + \frac{SH_1}{EF}\frac{1}{\sqrt{1+i^2}}\right]. \qquad (Б.118)$$

При $H < H_{1k}$ якорная цепь в расчетном отношении является длинной, и расчет ее следует производить согласно указаниям Б.2,Б.3 или Б.13-Б.14. При $H > H_{1k}$ якорная цепь работает как короткая, расчет ее следует производить согласно указаниям Б.8.

Якорная цепь с подвесным грузом может работать по одной из четырех расчетных схем:

первая схема - подвесной груз лежит на дне, перед ним некоторая длина верхнего участка цепи также лежит на дне (см. рисунок Б.8а);

вторая схема - подвесной груз лежит на дне, а цепь верхнего участка не касается дна (см. рисунок Б.8б);

третья схема - подвесной груз висит на цепи и не касается дна, а перед якорем имеется некоторая длина нижнего участка цепи, лежащая на дне (см. рисунок Б.8в);

четвертая схема - вся цепь от клюза до якоря не касается дна (см. рисунок Б.8г).

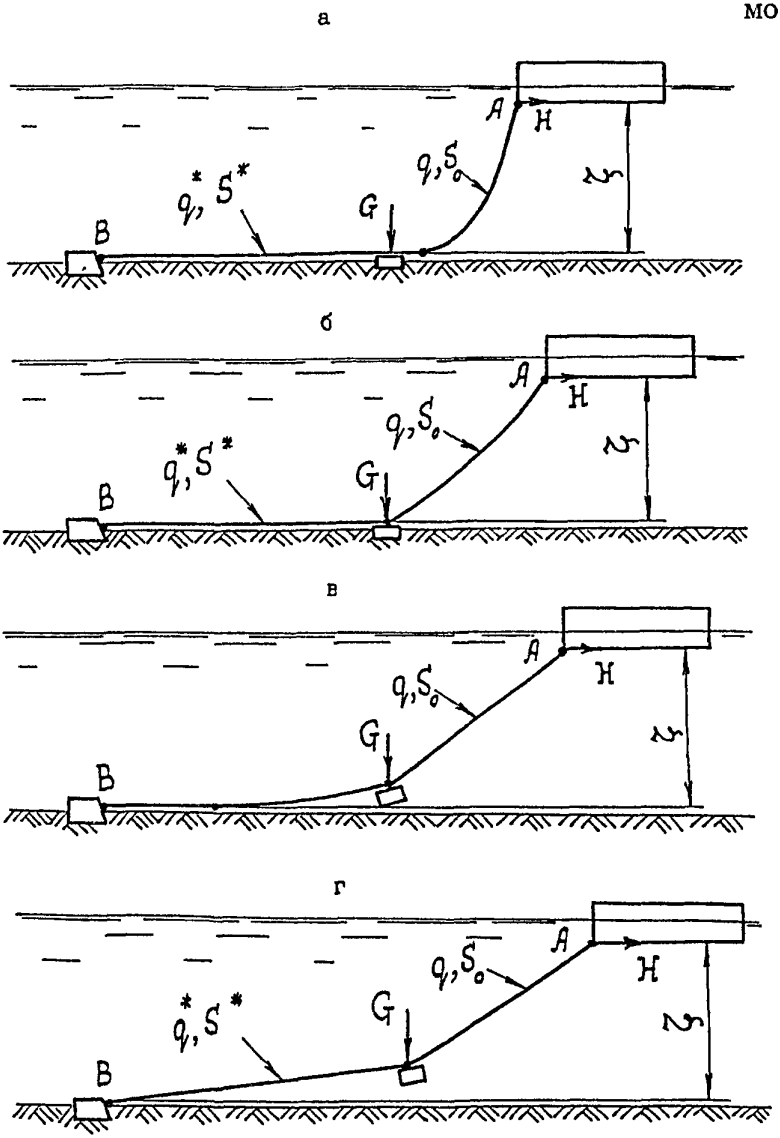
Значения горизонтальной составляющей натяжения цепи, соответствующие переходу работы цепи от одной расчетной схемы к другой, обозначены величинами:

H_{1k} - горизонтальная составляющая натяжения цепи при переходе работы цепи от первой схемы ко второй, кН

H_{2k} - горизонтальная составляющая натяжения цепи при переходе работы цепи от второй схемы к третьей, кН;

H_{3k} - горизонтальная составляющая натяжения цепи при переходе цепи от третьей схемы к четвертой, кн.

При величине натяжения $H < H_{1k}$ якорная связь работает по первой схеме и расчет следует выполнять как для длинной цепи без подвесного груза согласно указаниям Б.2, Б.3 или Б.14-Б.15. При $H_{1k} < H < H_{2k}$ якорная связь работает по второй схеме и расчет следует выполнять как для короткой цепи без подвесного груза согласно указаниям Б.8. При $H_{2k} < H < H_{3k}$ якорная связь работает по третьей схеме и расчет следует выполнять как для длинной цепи с подвесным грузом согласно указаниям Б.5-Б.6 или Б.17-Б.18. При $H > H_{3k}$ якорная связь работает по четвертой схеме и расчет следует выполнять как для короткой цепи с подвесным грузом согласно указаниям Б.11-Б.12.



а - при $H < H_{1k}$; б - при $H_{1k} < H < H_{2k}$;
в - при $H_{2k} < H < H_{3k}$; г - при $H > H_{3k}$

Рисунок Б.8 - Схемы работы якорной цепи с подвесным грузом

Значения натяжения H_{1k} следует определять по формулам (Б.116) или (Б.117). При этом под величиной S следует понимать длину верхнего участка цепи (от клюза до груза), а под величиной ζ - возвышение клюзовой точки над точкой крепления цепи к подвесному грузу, когда груз лежит на дне.

Значение H_{2k} следует вычислять по формулам

при ровном дне (обозначения по Б.11)

$$H_{2k} = \frac{q\sqrt{\left(S_0^2 - \zeta^2\right)\left[\left(S_0 + 2G/q\right)^2 - \zeta^2\right]}}{2\zeta}; \qquad \text{(Б.119)}$$

при наклонном дне (обозначения по Б.17)

$$H_{2k} = \frac{q\left(S^2 - \zeta^2\right)}{2\left[\left(1 + i^2\right)\zeta^2 - i^2S^2\right]} \times \left\{ i\left(S_0 + 2\frac{G}{q}\right) + \zeta\sqrt{\frac{\left[\left(S_0 + 2G/q\right)^2 - \left(1 + i^2\right)\zeta^2 + i^2S_0^2\right]}{\left(S_0^2 - \zeta^2\right)}} \right\}. \qquad \text{(Б.120)}$$

Значения натяжения H_{3k} следует находить из решения уравнений:

при ровном дне (обозначения по Б.11)

$$\sqrt{H_{3k}^2 + \left(qS_0 + G + q^*S^*\right)^2} - \sqrt{H_{3k}^2 + \left(G + q^*S^*\right)^2} + \frac{q}{q^*}\left[\sqrt{H_{3k}^2 + \left(q^*S^*\right)^2} - H_{3k}\right] = q\zeta; \qquad \text{(Б.121)}$$

при наклонном дне (обозначения по Б.17)

$$\sqrt{H_{3k}^2+\left(qS_0+G+q^*S^*+iH_{3k}\right)^2}-\sqrt{H_{3k}^2+\left(G+q^*S^*+iH_{3k}\right)^2}+$$
$$+\frac{q}{q^*}\left[\sqrt{H_{3k}^2+\left(q^*S^*+iH_{3k}\right)^2}-H_{3k}\sqrt{1+i^2}\right]=q\zeta. \qquad (Б.122)$$

Корни этих уравнений должны находиться подбором или путем последовательных приближений по формуле

$$H_{3k}^{(r+1)}=H_{3k}^{(r)}+\Delta^{(r)}, \qquad (Б.123)$$

где $r, r+1$ - номер итераций (приближений), r=1,2,...;

$\Delta^{(r)}$ - поправка, кН, к величине приближенного значения натяжения $H_{3k}^{(r)}$, вычисляемая по формуле

$$\Delta^{(r)}=-\frac{\Phi^{(r)}}{D^{(r)}}, \qquad (Б.124)$$

$\Phi^{(r)}$ - невязка, кН, вычисляемая как разница значений левой и правой частей уравнения (Б.121) или (Б.122) при $H_{3k}=H_{3k}^{(r)}$;

$D^{(r)}$ - вспомогательная величина, вычисляемая при $H_{3k}=H_{3k}^{(r)}$ по формулам

при ровном дне (обозначения по Б.11)

$$D=\frac{H_{3k}}{\sqrt{H_{3k}^2+\left(qS_0+G+q^*S^*\right)^2}}-\frac{H_{3k}}{\sqrt{H_{3k}^2+\left(G+q^*S^*\right)^2}}+$$
$$+\frac{q}{q^*}\left[\frac{H_{3k}}{\sqrt{H_{3k}^2+\left(q^*S^*\right)^2}}-1\right]; \qquad (Б.125)$$

при наклонном дне (обозначения по Б.17)

$$D = \frac{H_{3k} + i\left(qS_0 + G + q^*S^* + iH_{3k}\right)}{\sqrt{H_{3k}^2 + \left(qS_0 + G + q^*S^* + iH_{3k}\right)^2}} - \frac{H_{3k} + i\left(G + q^*S^* + iH_{3k}\right)}{\sqrt{H_{3k}^2 + \left(G + q^*S^* + iH_{3k}\right)^2}} + \\ + \frac{q}{q^*}\left[\frac{H_{3k} + i\left(q^*S^* + iH_{3k}\right)}{\sqrt{H_{3k}^2 + \left(q^*S^* + iH_{3k}\right)^2}} - \sqrt{1 + i^2}\right]. \qquad (Б.126)$$

На первом шаге вычислений значение натяжения $H_{3k}^{(1)}$ допускается принимать равным нулю. При практических расчетах для нахождения H_{3k} допускается ограничиваться тремя итерациями.

Приложение В

(рекомендуемое)

Основы динамики плавучих объектов на якорях в плоской постановке задачи

В.1 Жесткостные характеристики якорных систем и коэффициенты жесткости цепных опор

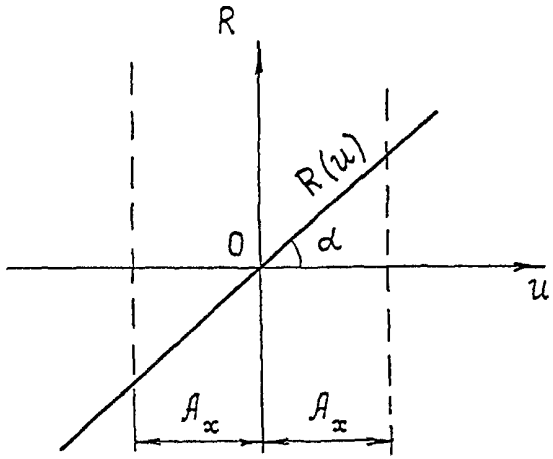
Под жесткостной характеристикой $R(u)$ якорной системы следует понимать связь между значениями внешних горизонтальных сил R, кН, действующих на плавучий объект, и горизонтальными перемещениями объекта на якорях u, м, которая приведена на рисунке В.1.

Необходимо различать симметричные и несимметричные графики $R(u)$ (симметрию следует понимать относительно начала осей координат). При симметричной якорной системе функция $R(u)$ также симметрична.

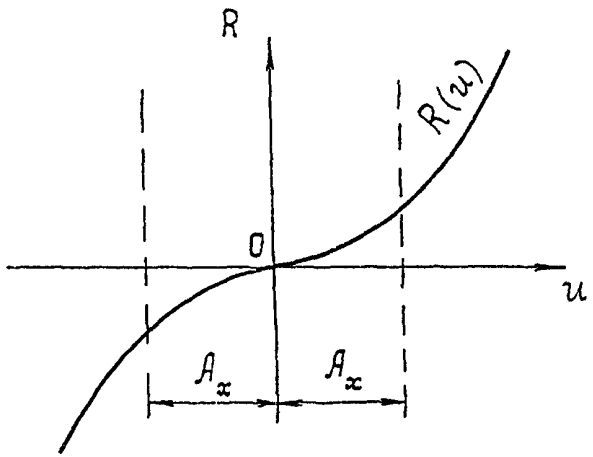
Жесткостная характеристика $R(u)$ должна строиться по данным статистических расчетов якорной системы, или по опытным данным, и представляется как графически, так и аналитически. Аналитическое представление функции $R(u)$ входит в расчетные выражения динамических расчетов.

В общем случае характеристика $R(u)$ нелинейная и должна представляться кривой с различными углами наклона $\alpha(u)$, т.е. разными значениями коэффициентов жесткости при различных перемещениях u. При симметричной якорной системе аналитическое выражение для нелинейной жесткостной характеристики следует принимать в виде нечетного полинома (см. рисунок В.1б)

а



б



а - линейная; б - нелинейная

Рисунок В.1 - Графики жесткостных характеристик для симметричных якорных систем

$$R(u) = K_1 u + K_2 u^3, \qquad (В.1)$$

где K_1, K_2 - численные коэффициенты.

Значения K_1, кН/м и K_2, кН/м^3, необходимо определять в соответствии с графиком $R(u)$ по ряду значений R и u.

При малых перемещениях плавучего объекта на якорях характеристику $R(u)$ допускается считать линейной и представлять в виде прямой как показано на рисунке В.1а

$$R(u) = Ku, \qquad (В.2)$$

Постоянную величину коэффициента жесткости К, кН/м, якорной системы допускается определять как тангенс угла наклона жесткостной характеристики

$$K = tg\alpha, \qquad (В.3)$$

или аналитически через коэффициенты жесткости цепных опор.

Коэффициенты жесткости якорной системы следует определять по формулам

$$K^{xx} = \sum_{j=1}^{n}\left(C_{\eta\eta j}\cos^2\vartheta_j + \frac{H_j}{\eta_j}\sin^2\vartheta_j\right), \qquad (В.4)$$

$$K^{yy} = \sum_{j=1}^{n}\left(C_{\eta\eta j}\sin^2\vartheta_j + \frac{H_j}{\eta_j}\cos^2\vartheta_j\right), \qquad (В.5)$$

$$K^{zz} = \sum_{j=1}^{n} C_{\zeta\zeta j}, \qquad (B.6)$$

где K^{xx}, K^{yy} - коэффициенты жесткости якорной системы при горизонтальных перемещениях плавучего объекта вдоль осей x и y соответственно (см. рисунок В.2), кН/м;

K^{zz} - коэффициент жесткости якорной системы при вертикальных перемещениях плавучего объекта, кН/м;

H_j, η_j - горизонтальная составляющая натяжения H_j, кН, и полная горизонтальная проекция η_j, м, j-й якорной связи;

$C_{\eta\eta j}$ - коэффициент жесткости j-й цепной опоры, характеризующий изменение горизонтальной составляющей натяжения H_j в якорной связи при изменении ее горизонтальной проекции η_j, кН/м;

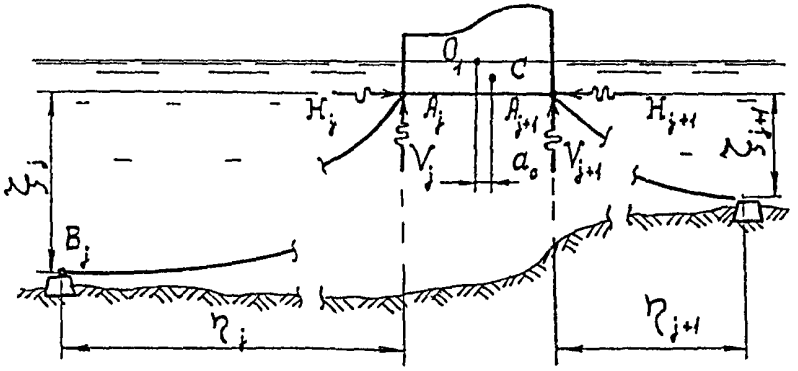
$C_{\zeta\zeta j}$ - коэффициент жесткости j-й цепной опоры, характеризующий изменение вертикальной составляющей натяжения V_j в якорной связи в точке крепления к цепной опоре при изменении расстояния ζ_j по вертикали между точками крепления якорной связи к цепной опоре и якорю, кН/м;

ϑ_j - угол между горизонтальной проекцией η_j j-й якорной связи и осью x (см. рисунок В.2);

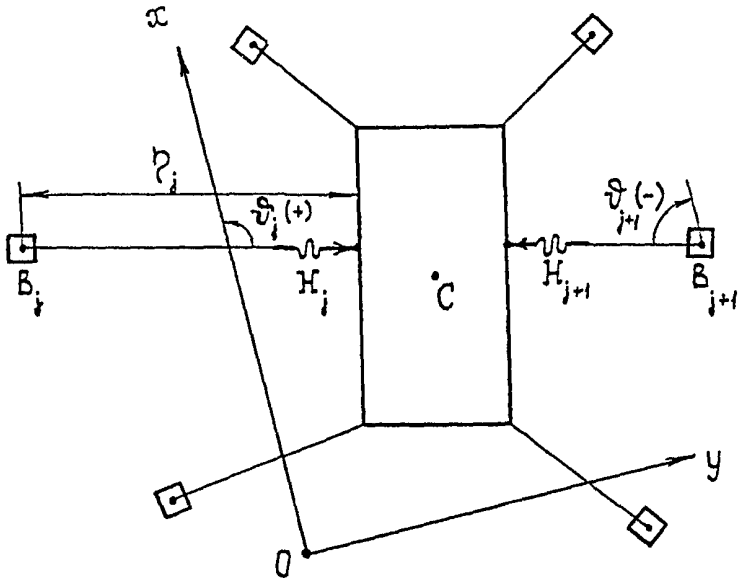
n - количество якорных связей.

Значения величин $H_j, \eta_j, \vartheta_j, C_{\eta\eta j}, C_{\zeta\zeta j}$ в формулах (В.4)-(В.6) должны соответствовать положению статического равновесия системы, относительно которого рассматриваются колебания корпуса плавучего объекта.

а



б



а - в вертикальной плоскости; б - в плане

Рисунок В.2 - Расчетная схема к определению коэффициентов жесткости якорной системы

Коэффициенты жесткости $C_{\eta\eta}$, $C_{\zeta\zeta}$ цепной опоры при работе якорной связи по схеме длинных цепей без подвесных грузов следует вычислять по формулам:

при ровном дне (обозначения величин в формулах (В.7)-(В.10) в соответствии с Б.2, Б.3)

$$C_{\eta\eta} = \frac{H_2}{\eta_2 - a_2\left(D_2^2 / D_1 + D_1\right)}, \qquad (В.7)$$

$$C_{\zeta\zeta} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 C_{\eta\eta}, \qquad (В.8)$$

где $D_1 = \frac{V_2}{T_2}$, (В.9)

$$D_2 = \frac{H_2}{T_2} - 1; \qquad (В.10)$$

при наклонном дне (обозначения в формулах (В.11)-(В.14) согласно Б.14, Б.15)

$$C_{\eta\eta} = \frac{H_2}{\eta_2 - a_2\left(\frac{D_2^2}{D_1} + iD_2 + D_1 + \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}\right)}, \qquad (В.11)$$

$$C_{\zeta\zeta} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 C_{\eta\eta}, \qquad (В.12)$$

где $D_1 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}} - \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$, (В.13)

$$D_2 = \frac{H_2}{T_{2A}} - \frac{1}{\sqrt{1+i^2}}. \qquad (В.14)$$

Коэффициенты жесткости $C_{\eta\eta}$ и $C_{\zeta\zeta}$ цепной опоры при работе якорной связи по схеме короткой цепи без подвесного груза следует вычислять по формулам (В.7) и (В.8), в которых значения величин D_1 и D_2 должны определяться из выражений

$$D_1 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}} - \frac{V_{2B}}{T_{2B}}, \qquad (В.15)$$

$$D_2 = \frac{H_2}{T_{2A}} - \frac{H_2}{T_{2B}}. \qquad (В.16)$$

В этом случае обозначения величин в формулах (В.7), (В.8), (В.15), (В.16) соответствует обозначениям пункта Б.8.

Коэффициенты жесткости $C_{\eta\eta}$ и $C_{\zeta\zeta}$ цепной опоры при работе якорной связи по схеме длинной цепи с подвесным грузом или плавучестью следует вычислять:

при ровном дне по формулам (В.7) и (В.8), в которых значения величин D_1 и D_2 следует находить из выражений

$$D_1 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}} - \frac{\left(V^*_{2C} \pm G\right)}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\frac{V^*_{2C}}{T^*_{2C}}, \qquad (В.17)$$

$$D_2 = \frac{H_2}{T_{2A}} - \frac{H_2}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\left(\frac{H_2}{T^*_{2C}} - 1\right); \qquad (В.18)$$

при наклонном дне по формулам (В.11) и (В.12), в которых значения величин D_1 и D_2 следует находить из выражений

$$D_1 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}} - \frac{\left(V^*_{2C} \pm G\right)}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\left(\frac{V^*_{2C}}{T^*_{2C}} - \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}\right), \qquad (В.19)$$

$$D_2 = \frac{H_2}{T_{2A}} - \frac{H_2}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\left(\frac{H_2}{T^*_{2C}} - \frac{1}{\sqrt{1+i^2}}\right). \qquad (В.20)$$

При ровном дне обозначения в формулах (В.7), (В.8), (В.17), (В.18) соответствуют Б.5-Б.7, а при наклонном дне обозначения в формулах (В.11), (В.12), (В.19), (В.20) соответствуют Б.17-Б.19.

Коэффициенты жесткости $C_{\eta\eta}$ и $C_{\zeta\zeta}$ цепной опоры при работе якорной связи по схеме короткой цепи с подвесным грузом или плавучестью следует вычислять по формулам (В.7) и (В.8), в которых значения величин D_1 и D_2 должны определяться из выражений

$$D_1 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}} - \frac{\left(V^*_{2C} \pm G\right)}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\left(\frac{V^*_{2C}}{T^*_{2C}} - \frac{V_B}{T_B}\right), \qquad (В.21)$$

$$D_2 = \frac{H_2}{T_{2A}} - \frac{H_2}{\sqrt{H_2^2 + \left(V^*_{2C} \pm G\right)^2}} + \frac{q}{q^*}\left(\frac{H_2}{T^*_{2C}} - \frac{H_2}{T_B}\right). \qquad (В.22)$$

Обозначения величин в формулах (В.7), (В.8), (В.21), (В.22) в этом случае соответствуют обозначениям Б.11-Б.13.

В.2 Расчеты колебаний плавучих объектов в линейной постановке задач

В.2.1 Горизонтальные колебания

При малых колебаниях плавучего объекта (линейная постановка задач) частоту λ_x, $с^{-1}$, свободных колебаний без учета затухания следует определять по формуле

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{K^{xx}}{M + M_x}}, \qquad (В.23)$$

где K^{xx} - коэффициент жесткости якорных связей плавучего объекта при горизонтальных перемещениях, определяемых по формуле (В.3) или (В.4), (В.5) [применительно к формуле (В.23) $K^{xx} = K = tg\alpha$, кН/м];

M - масса корпуса плавучего объекта, т;

M_x - суммарная присоединенная масса от инерционного влияния воды $M_{x\omega}$ и якорных цепей M_{xa} при горизонтальных колебаниях $M_x = M_{x\omega} + M_{xa}$, т.

Значения присоединенных масс воды $M_{x\omega}$ для плавучих объектов с различной формой подводной части допускается вычислять по известным рекомендациям из теории качки судов.

Для плавучих причалов и доков массу $M_{x\omega}$, т, допускается определять по формуле

$$M_{x\omega} = 3{,}14\rho\mu_{x\omega}TA, \qquad (В.24)$$

где ρ - плотность воды, $т/м^3$;

$\mu_{x\omega}$ - коэффициент, принимаемый по таблице В.1, в которой обозначено: d - глубина воды в месте установки, м; λ - длина волн, м;

T - осадка плавучего объекта, м;

A - боковая (при поперечных) или лобовая (при продольных колебаниях) подводная площадь парусности плавучего объекта, $м^2$.

Таблица В.1 - Значения коэффициента $\mu_{x\omega}$

Относительная осадка T / d	Значения $\mu_{x\omega}$ при λ / T равном				
	10	20	30	40	50
0,05	0,30	0,52	1,00	1,05	1,03
0,50	0,30	0,52	1,10	1,40	1,66
0,90	0,30	0,52	1,12	1,60	2,02

Присоединенная масса воды m_{xa}, т, отдельной якорной цепи при горизонтальных колебаниях должна определяться из выражения

$$m_{xa} = (0{,}30M_a + M_c)\left(\frac{H_2}{0{,}50G_a + G}\right)^2 \frac{l_2^2}{l_2^2 - \zeta^2}, \qquad (B.25)$$

где M_a - масса якорной связи (цепи) на длине свободного провеса с учетом присоединенной массы воды, т;

M_c - масса подвешенного к якорной связи груза с учетом присоединенной массы воды, т;

H_2 - горизонтальная составляющая натяжения якорной связи в рабочем состоянии, кН;

G_a - сила тяжести (вес) в воде якорной связи на длине свободного провеса, кН;

G - сила тяжести (вес) в воде подвешенного к связи груза, кН;

l_2 - длина свободного провеса якорной связи в рабочем состоянии, м;

ζ - вертикальная проекция свободного провеса якорной связи, м.

Массу μ, т/м, единицы длины якорной цепи с учетом присоединенной массы воды необходимо вычислять по формуле

$$\mu = 1{,}30\frac{q}{g}, \qquad \text{(В.26)}$$

где q - сила тяжести (вес) единицы длины цепи в воде, кН/м;

g - ускорение силы тяжести.

Массу M_c, т, подвешенного к связи груза с учетом присоединенной массы воды следует определять из выражения

$$M_c = k\frac{G}{g}, \qquad \text{(В.27)}$$

где $k = 1{,}30$ - для стальных и чугунных грузов;

$k = 2{,}30$ - для железобетонных грузов.

Присоединенная масса M_{xa}, т, от всех якорных связей при горизонтальных колебаниях

$$M_{xa} = \sum_{j=1}^{n} m_{xaj}, \qquad \text{(В.28)}$$

где j - номер связи;

n - число связей.

Частоту ω_x, $с^{-1}$, свободных колебаний плавучего объекта с учетом затухания необходимо вычислять по формуле

$$\omega_x = \sqrt{\lambda_x^2 - n_x^2}, (n_x < \lambda_x), \qquad (B.29)$$

где n_x - коэффициент затухания, $с^{-1}$, определяемый из выражения

$$n_x = \frac{\beta_x}{2(M + M_x)}, \qquad (B.30)$$

где β_x - коэффициент пропорциональности между силой сопротивления и скоростью перемещения корпуса объекта.

Коэффициент затухания колебаний причалов без ошвартованных кораблей и плавучих доков допускается принимать n_x=0,15 $с^{-1}$, а для плавучих причалов с ошвартованными кораблями - n_x=0,33 $с^{-1}$. Для плавучих волноломов коэффициент затухания рекомендуется принимать n_x=0,20 $с^{-1}$.

Внешняя горизонтальная сила $P_x(t)$, кН, действующая на корпус плавучего объекта при регулярном волнении должна определяться по формуле

$$P_x(t) = P_x \sin(\omega t + \delta), \qquad (B.31)$$

где P_x - амплитуда волновой нагрузки на плавучий объект, кН;

ω - частота волн, $с^{-1}$, ($\omega = \frac{2\pi}{T}$, T - период волн, с);

δ - начальная фаза.

Коэффициент k_{dx} с учетом затухания следует определять из выражения

$$n_z = \frac{\beta_z}{2(M + M_z)}, \qquad (В.41)$$

$$\omega_z = \sqrt{\lambda_z^2 - n_z^2}, (n_z < \lambda_z), \qquad (В.42)$$

где K^{zz} - коэффициент жесткости якорных связей плавучего объекта при вертикальных перемещениях, кН/м;

γ - сила тяжести единицы объема воды (объемный вес), кН/м;

A_w - площадь ветерлинии, м^2;

M_z - суммарная присоединенная масса от инерционного влияния воды M_{zw} и якорных цепей M_{za} при вертикальных колебаниях, $M_z = M_{zw} + M_{za}$, т;

β_z - коэффициент пропорциональности между силой сопротивления и скоростью перемещения корпуса объекта.

Значение присоединенной массы M_{zw}, т, *для плавучих причалов и* доков допускается определять по формуле

$$M_{zw} = 0{,}785\mu_{zw}\rho b A_w, \qquad (В.43)$$

где ρ - плотность воды, т/м^3;

μ_{zw} - коэффициент, принимаемый по таблице В.2, в которой Т - осадка плавучего объекта, м;

b - размер подводной прямоугольной части плавучего объекта (ширина или длина), принимаемый по направлению луча волны, м.

Таблица В.2 - Значения коэффициента μ_{zw}

b / T	1	2	3	5	10
μ_{zw}	2,2	1,08	0,75	0,50	0,40

Коэффициенты затухания при вертикальных колебаниях плавучих объектов допускается принимать равными n_z=0,20 c^{-1}.

Внешнюю вертикальную силу $P_z(t)$, кН, действующую на корпус плавучего объекта при регулярном волнении, а также коэффициент динамичности k_{dz} с учетом затухания необходимо вычислять из выражений (В.31), (В.32), в которых индекс x следует заменить на индекс z. При совпадении частот вынужденных ω и свободных λ_z колебаний, т.е. при резонансе

$$k_{dz} = \frac{\lambda_z}{2n_z}. \qquad (B.44)$$

Вертикальные перемещения w, м, плавучего объекта при колебаниях должны определяться из выражения

$$w = A_z \sin(\omega t + \delta + \varepsilon). \qquad (B.45)$$

Амплитуду вынужденных колебаний A_z, м, надлежит вычислять по формуле

$$A_z = \frac{P_z}{\lambda_z^2 (M + M_z)} k_{dz} = \frac{P_z}{(\kappa^{zz} + \gamma A_w)} k_{dz}, \qquad (B.46)$$

где ω, δ, ε - обозначения те же, что и в В.2.1.

В.2.3 Вращательные колебания

Частоты свободных вращательных колебаний без учета затухания λ_φ, $с^{-1}$, и с учетом затухания ω_φ, $с^{-1}$, а также коэффициент затухания n_φ, $с^{-1}$, следует определять по формулам

$$\lambda_\varphi = \sqrt{\frac{\Omega_y}{\Theta_y + \Theta_{\varphi y}}}, \qquad (В.47)$$

$$n_\varphi = \frac{\mu_y}{2\left(\Theta_y + \Theta_{\varphi y}\right)}, \qquad (В.48)$$

$$\omega_\varphi = \sqrt{\lambda_\varphi^2 - n_\varphi^2}, \left(n_\varphi < \lambda_\varphi\right), \qquad (В.49)$$

где $\Omega_y = K_{cc}^{xx} + \gamma A_w a_0^2 + \gamma I_{0y}$; (В.50)

$$K_{CC}^{xx} = K^{xx} r^2. \qquad (В.51)$$

где Θ_y - момент инерции массы корпуса относительно оси Y, проходящей через центр тяжести корпуса перпендикулярно плоскости колебаний, $т \cdot м^2$;

$\Theta_{\varphi y}$ - присоединенный момент инерции относительно той же оси Y от инерционного влияния воды и якорных связей при вращательных колебаниях, $т \cdot м^2$;

μ_y - коэффициент пропорциональности между моментом сопротивления и скоростью поворота корпуса;

r - расстояние по вертикали между центром тяжести корпуса (точкой С) и клюзовыми точками, м, (см. рисунок В.2а);

a_0 - расстояние по горизонтали между центром тяжести корпуса (точкой С) и центром тяжести площади ватерлинии (точкой O_1), м;

I_{0y} - момент инерции площади ватерлинии относительно горизонтальной оси, проходящей через точку перпендикулярно плоскости колебаний, $м^4$.

Коэффициент затухания колебаний допускается принимать равным $n_\varphi=0{,}05\ с^{-1}$.

Относительно оси Y момент $M_y(t)$, кН·м, внешних сил, действующих на корпус плавучего объекта при регулярном волнении необходимо вычислять по формуле

$$M_y(t) = M_y \sin(\omega t + \delta), \qquad (В.52)$$

где M_y - амплитуда момента от волнового давления, кН·м;

ω, δ - обозначения те же, что и в В.2.1.

Повороты φ_y, рад., корпуса плавучего объекта вокруг оси Y следует находить из выражения

$$\varphi_y = A_\varphi \sin(\omega t + \delta + \varepsilon); \qquad (В.53)$$

Амплитуду A_φ, рад., колебаний надлежит определять по формуле

$$A_\varphi = \frac{M_y}{\lambda_\varphi^2(\Theta_y + \Theta_{\varphi y})} k_{d\varphi} = \frac{M_y}{\Omega_y} k_{d\varphi}, \qquad (В.54)$$

где $k_{d\varphi}$ - коэффициент динамичности с учетом затухания,

должен вычисляться по формуле (В.32), где индекс х следует заменить на φ;

ε - обозначение то же, что и в В.2.1.

При резонансе, когда совпадают частоты вынужденных и свободных колебаний коэффициент динамичности необходимо определять по формуле (В.33), где индекс х заменяется на φ.

В.3 Расчеты горизонтальных колебаний плавучих объектов в нелинейной постановке

При немалых колебаниях (нелинейная постановка задач), т.е. при нелинейной жесткостной характеристике $R(u)$ (рисунок В.1 б) частоту λ_x, $с^{-1}$, свободных колебаний плавучего объекта следует определять по формуле

$$\lambda_x^2 = s^2 + 0{,}732\nu A_x^2, \qquad (В.55)$$

где

$$s^2 = \frac{K_1}{M + M_x}, \qquad (В.56)$$

$$\nu = \frac{K_2}{M + M_x}, \qquad (В.57)$$

где K_1, K_2, M, M_x - обозначения те же, что и в В.2.1;

A_x - амплитуда горизонтальных колебаний, м.

Внешнюю горизонтальную силу $P_x(t)$, кН, действующую на корпус плавучего объекта при регулярном волнении необходимо вычислять по формуле (В.31).

Амплитуда A_x, м, вынужденных колебаний плавучего объекта должна определяться из выражения

$$0{,}732\nu A_x^3 + \left(s^2 - \omega^2\right)A_x = \sqrt{\left(\frac{P_x}{M + M_x}\right)^2 - 4n_x^2\omega^2 A_x^2}\,, \qquad (B.58)$$

где n_x, ω, P_x - обозначения те же, что и в В.2.1.

Уравнение (В.58) необходимо решать подбором. Его корень A_x графически представляется как абсцисса точки пересечения кривых

$$y_1 = 0{,}732\nu A_x^3 + \left(s^2 - \omega^2\right)A_x, \qquad (B.59)$$

$$y_2 = \sqrt{\left(\frac{P_x}{M + M_x}\right)^2 - 4n_x^2\omega^2 A_x^2}\,. \qquad (B.60)$$

Практический интерес представляют:

- значения частот λ_x при значениях амплитуд A_x, обусловленных действием расчетных внешних сил;

- значения амплитуд A_x, при которых следуют значения частот λ_x, близких к частоте ω волн.

Горизонтальные составляющие усилий (распоры) в передней H_{2d}, кН, и тыловой $\overline{H}_{2d}$, кН, якорных связях в рабочих состояниях с учетом динамического действия волнения следует находить из выражений

$$H_{2d} = K_1 A_x + K_2 A_x^3 + H_2, \qquad (B.61)$$

$$\overline{H}_{2d} = H_{2d}, \qquad (B.62)$$

где H_2 - обозначения те же, что и В.2.1.

После определения H_{2d}, $\overline{H}_{2d}$ другие параметры якорных связей необходимо вычислять по формулам для статических расчетов, согласно требованиям приложения Б.

Приложение Г

(рекомендуемое)

Динамика якорных связей как элементов якорных систем

Г.1 Расчеты колебаний коротких якорных связей без подвесных грузов

Статический расчет якорных систем с короткими цепями без подвесных грузов следует производить согласно требованиям Б.7-Б.10. В качестве исходных данных для динамического расчета колебаний цепи в соответствии с рисунком Г.1 должны приниматься следующие известные из статических расчетов величины:

- a_2 - параметр цепной линии в рабочем состоянии, м;
- η_2, ζ - горизонтальная и вертикальная проекции свободного провиса цепи в рабочем состоянии, м;
- x_{2A}, x_{2B} - координатные параметры, м;
- T_{2A} - полное натяжение цепи в цепной опоре (клюзовой точке) в рабочем состоянии, кН;
- T_{2B} - полное натяжение цепи в точке крепления к якорю в рабочем состоянии, кН;
- T_{2m} - среднее натяжение цепи в рабочем состоянии, $T_{2m} = 0{,}5\left(T_{2A} + T_{2B}\right)$, кН;
- q - сила тяжести единицы длины цепи в воде, кН/м;
- E - модуль упругости цепи, кПа;
- F - площадь поперечного сечения общего звена цепи, $м^2$.

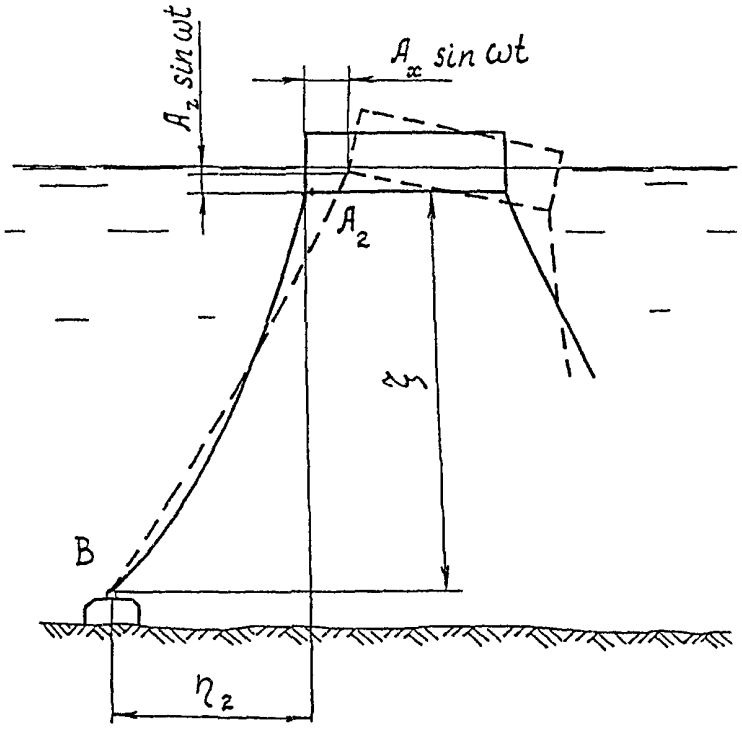


Рисунок Г.1 - Расчетная схема для колебаний короткой цепи без подвесного груза

Дополнительными исходными данными должны являться:

A_x, A_z - амплитуды горизонтальных и вертикальных вынужденных колебаний плавучего объекта, м, определяемые согласно требованиям В.2-В.3;

ω - частота волн, $с^{-1}$, ($\omega = \frac{2\pi}{T}$, T - период волн, с);

μ - масса единицы длины якорной цепи с учетом присоединенной массы воды, т/м, определяемая по рекомендациям В.2.1.

Частоты λ_i, $с^{-1}$, свободных колебаний в плоскости провисания якорной цепи с опорами на разных уровнях следует определять из выражений

$$\lambda_i^2 = \frac{i^2\pi^2 T_{2m}}{\mu\eta_2^2} + \frac{8a_2^2 i^2\pi^2 EF}{\mu\left(\eta_2^2 + a_2^2 i^2\pi^2\right)^2}\,ch^2\frac{\eta_2}{2a_2}\,ch^2\frac{x_{2A}+x_{2B}}{2a_2} + \\ + \frac{i^2\pi^2 EF}{4\mu\eta_2^3}\left(a_2 sh\frac{\eta_2}{a_2}\,ch\frac{x_{2A}+x_{2B}}{a_2} - \eta_2\right), (i = 1,3,5\ldots), \quad (Г.1)$$

$$\lambda_i^2 = \frac{i^2\pi^2 T_{2m}}{\mu\eta_2^2} + \frac{2i^2\pi^2\zeta^2 EF}{\mu\left(\eta_2^2 + a_2^2 i^2\pi^2\right)^2} + \\ + \frac{i^2\pi^2 EF}{4\mu\eta_2^3}\left(a_2 sh\frac{\eta_2}{a_2}\,ch\frac{x_{2A}+x_{2B}}{a_2} - \eta_2\right), (i = 2,4,6\ldots) \quad (Г.2)$$

Частоты λ_i, $с^{-1}$, свободных колебаний якорной цепи с опорами на одном уровне необходимо вычислять по формулам

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{i^2}{\mu\eta_2^2}\left[9{,}8696T_{2m} + k_1 EF + \frac{8k_2 EF}{\left(1 + k_3 i^2\right)^2}\right]}, (i = 1,3,5\ldots), \quad (Г.3)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{i^2}{\mu\eta_2^2}\left(9{,}8696T_{2m} + k_1 EF\right)}, \left(i = 2,4,6...\right), \qquad (Г.4)$$

где k_1, k_2, k_3 - численные коэффициенты, приведенные в таблице Г.1 в зависимости от отношений η_2 / a_2.

Таблица Г.1

η_2 / a_2	k_1	k_2	k_3
1	2	3	4
0,05	0,0	3950,2892	3947,8416
0,10	0,00493	989,5281	986,9604
0,20	0,01604	249,2137	246,7401
0,30	0,03701	112,1546	109,6623
0,40	0,06662	64,1897	61,6850
0,50	0,10412	41,9966	39,4784
0,60	0,15093	29,9557	27,4156
0,70	0,20656	22,7128	20,1421
0,80	0,27172	17,8580	15,4213
0,90	0,34681	14,8240	12,1847
1,00	0,43229	12,5490	9,8696
1,10	0,52847	10,8831	8,1567
1,20	0,63638	9,6325	6,8539
1,30	0,75616	8,6752	5,8400
1,40	0,88879	7,9336	5,0355
1,50	1,03516	7,3529	4,3865

Г.1.1 Горизонтальные колебания

При горизонтальных колебаниях плавучего объекта по закону $u = A_x \sin \omega t$ полное наибольшее натяжение T_A, кН, цепи в клюзовой точке, с учетом динамической составляющей, следует определять из выражения

$$T_A = T_{2A} + A_x EF\left[\frac{\tau}{tg\tau\eta_2} + sh\frac{x_{2A}}{a_2}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{\delta_i}{\lambda_i^2 - \omega^2} \times \right.$$
$$\left. \times\left(1 + \frac{\rho_i}{2\tau} - \frac{\omega}{\lambda_i}\sin\frac{\pi\lambda_i}{2\omega}\right)\right], \qquad (Г.5)$$

где: $$\tau = \sqrt{\frac{\mu\omega^2}{T_{2m} + EF}}, \qquad (Г.6)$$

$$\delta_i = \frac{2EF}{\mu\eta_2^2}\frac{a_2 i^2\pi^2}{\left(\eta_2^2 + i^2 a_2^2\pi^2\right)}\left(ch\frac{x_{2B}}{a_2}\cos i\pi - ch\frac{x_{2A}}{a_2}\right), \qquad (Г.7)$$

$$\rho_i = \frac{i^2 a_2^2\pi^2\left(i\pi + \tau\eta_2\right)}{\eta_2^3 + a_2^2\eta_2\left(i\pi + \tau\eta_2\right)^2} - \frac{i^2 a_2^2\pi^2\left(i\pi - \tau\eta_2\right)}{\eta_2^3 + a_2^2\eta_2\left(i\pi - \tau\eta_2\right)^2}. \qquad (Г.8)$$

Для цепей с малыми стрелами провисов в предварительных расчетах допускается значение полного наибольшего натяжения T_A, кН, цепи в клюзовой точке определять по формуле

$$T_A = T_{2A} + \frac{A_x EF}{tg\tau\eta_2}. \qquad (Г.9)$$

Г.1.2 Вертикальные колебания

При вертикальных колебаниях плавучего объекта по закону $w = A_z \sin\omega t$ полное наибольшее натяжение T_A, кН, цепи в клюзовой точке, с учетом динамической составляющей необходимо вычислять из выражения

$$T_A = T_{2A} + \frac{A_z EF}{\eta_2}\left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\delta_i}{\lambda_i^2 - \omega^2}\left(1 + \frac{\rho_i}{2\tau} - \frac{\omega}{\lambda_i}\sin\frac{\pi\lambda_i}{2\omega}\right)\right]\mathrm{sh}\frac{x_{2A}}{a_2}, \qquad (Г.10)$$

где $\sigma_i = \zeta\delta_i - 2\omega^2$, (Г.11)

а величины δ_1, ρ_1 определяются по выражениям (Г.7), (Г.8).

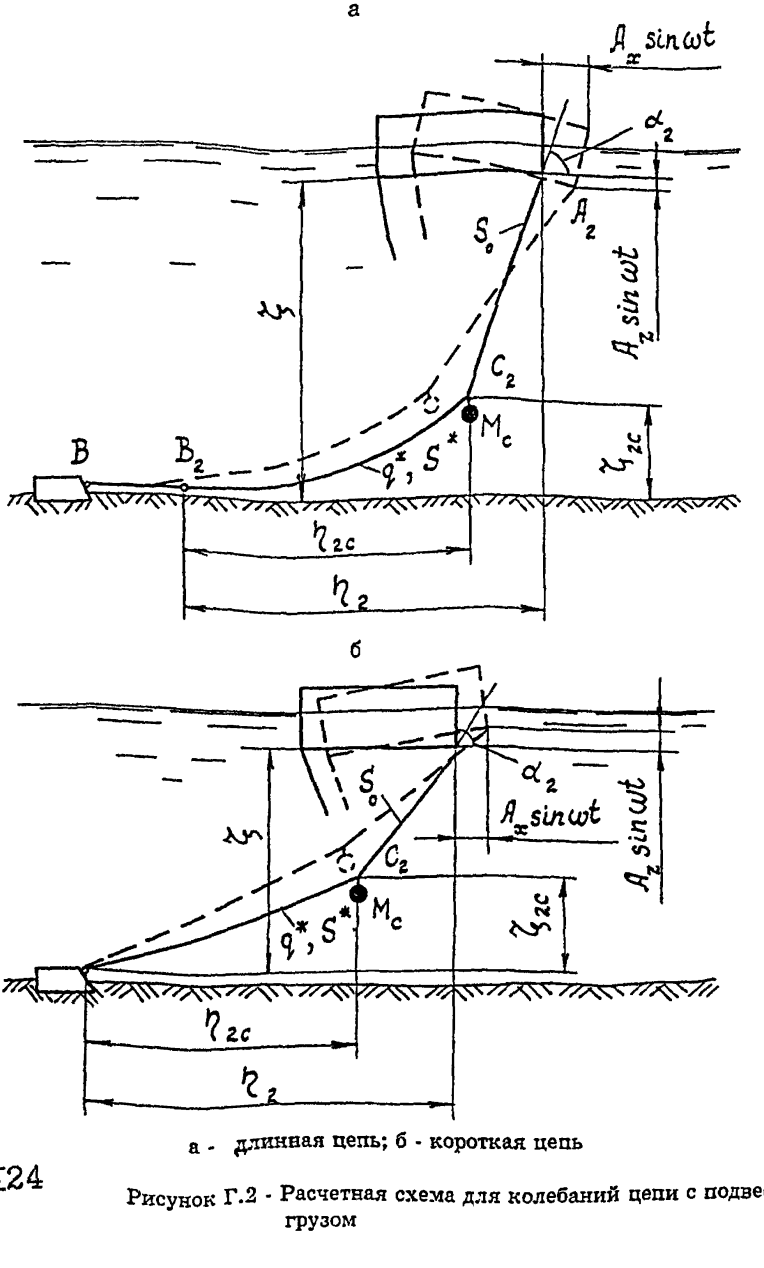
В предварительных расчетах цепей с малыми стрелами провисов допускается значение полного наибольшего натяжения T_A, кН, цепи в клюзовой точке находить по формуле

$$T_A = T_{2A} + \frac{A_z EF}{\eta_2}\mathrm{sh}\frac{x_{2A}}{a_2}. \qquad (Г.12)$$

Г.2 Расчеты колебаний якорных связей с подвесными грузами

Статический расчет якорных систем с длинными и короткими цепями с подвесными грузами следует производить согласно требованиям Б.5-Б.7, Б.11-Б.13. В качестве исходных данных для динамического расчета колебаний цепи в соответствии с рисунком Г.2 следует принимать следующие известные из статических расчетов величины:

a_2^* - параметр цепной линии нижнего участка цепи в ра-



а - длинная цепь; б - короткая цепь

Рисунок Г.2 - Расчетная схема для колебаний цепи с подвесным грузом

бочем состоянии, м;

S_0 - длина верхнего участка цепи от клюза до груза, м;

S^* - длина нижнего участка цепи от груза до якоря, м;

l_2 - длина свободного провиса всей цепи в рабочем состоянии, м;

η_{2C}, ζ_{2C} - горизонтальная η_{2C} и вертикальная ζ_{2C} проекции свободного провиса нижнего участка цепи, м;

H_2 - горизонтальная составляющая натяжения цепи в рабочем состоянии, кН;

T_{2A} - полное натяжение цепи в клюзовой точке в рабочем состоянии, кН;

V_{2A} - вертикальная составляющая усилия в клюзовой точке в рабочем состоянии, кН;

E - модуль упругости верхнего участка цепи, кПа;

F - площадь поперечного сечения общего звена верхнего участка цепи, $м^2$;

q^* - сила тяжести единицы длины цепи в воде для нижнего участка цепи, кН/м.

Дополнительными исходными данными должны являться:

A_x, A_z - амплитуды горизонтальных A_x и вертикальных A_z вынужденных колебаний плавучего объекта, м, определяемые согласно требованиям В.2, В.3;

ω - частота волн, $с^{-1}$, ($\omega = \frac{2\pi}{T}$, T - период волн, с);

M_c - масса подвешенного к цепи груза с учетом присоединенной массы воды, т, определяемая согласно В.1.

Коэффициент жесткости C_0, кН/м, верхнего участка цепи в точке подвеса груза необходимо вычислять по формуле

$$C_0 = \frac{EF}{S_0}. \qquad (Г.13)$$

Для длинных цепей коэффициенты жесткости C_1, C_2, кН/м, нижнего участка цепи в точке подвеса груза должны определяться в соответствии с В.1 ($C_1 = C_{\eta\eta}, C_2 = C_{\zeta\zeta}$).

Для коротких цепей коэффициенты жесткости C_1, C_2, кН/м, нижнего участка цепи в точке подвеса груза следует вычислять по формулам (В.11) и (В.12) ($C_1 = C_{\eta\eta}, C_2 = C_{\zeta\zeta}$).

Коэффициенты жесткости K_{xz}, K_{zz}, кН/м, всей цепи в точке подвеса груза необходимо определять из выражений

$$K_{xx} = C_1 + C_0 \cos\alpha_2 \sin\alpha_2, \qquad (Г.14)$$

$$K_{zz} = C_2 + C_0 \sin^2\alpha_2 + \frac{T_{2A}}{S_0}, \qquad (Г.15)$$

где: $\sin\alpha_2 = \frac{V_{2A}}{T_{2A}}$, (Г.16)

$$\cos\alpha_2 = \frac{H_2}{T_{2A}}. \qquad (Г.17)$$

Частота λ_{zc}, $с^{-1}$, свободных вертикальных колебаний подвесного груза должна определяться по формуле

$$\lambda_{zc} = \sqrt{\frac{K_{zz}}{M_c}}. \qquad (Г.18)$$

Полное наибольшее натяжение T_A, кН, цепи в клюзовой точке, с учетом динамической составляющей, следует вычислять по формуле

$$T_A = T_{2A} + \left(A_z + \frac{K_{xz}}{K_{zz}} A_x \right) C_0 \frac{\omega}{\lambda_{zc}} \sin\alpha_2. \qquad (Г.19)$$

Приложение Д

(справочное)

Расчет распределения внешней нагрузки между якорными связями

Для расчета распределения внешней нагрузки между якорными связями должны быть заданы значения внешних горизонтальных статических нагрузок на плавучее сооружение, точки приложения этих нагрузок и построены жесткостные характеристики каждой якорной связи.

Жесткостная характеристика якорной связи устанавливает соотношение между горизонтальным натяжением H цепи и горизонтальной проекцией η расстояния от клюзовой точки до якоря и строится на основе расчетов согласно приложения Б.

Распределение усилий между якорными связями и значения горизонтальных перемещений плавучего объекта в общем случае следует определять из решения системы уравнений равновесия плавучего сооружения на якорях

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{n} H_j \cos\vartheta_j = P_x;\ \sum_{j=1}^{n} H_j \sin\vartheta_j = P_y \\ &\sum_{j=1}^{n} H_j\left[(x_j - x_o)\sin\vartheta_j - (y_j - y_o)\cos\vartheta_j\right] = M \end{aligned}\right\}, \qquad (Д.1)$$

где H_j - горизонтальная составляющая натяжения j-1 якорной связи (j=1,2,...,n; n - число связей);

P_x, P_y - проекции на оси неподвижной системы координат OXY , действующих на плавучее сооружение внешних статических сил (см. рисунок Д.1);

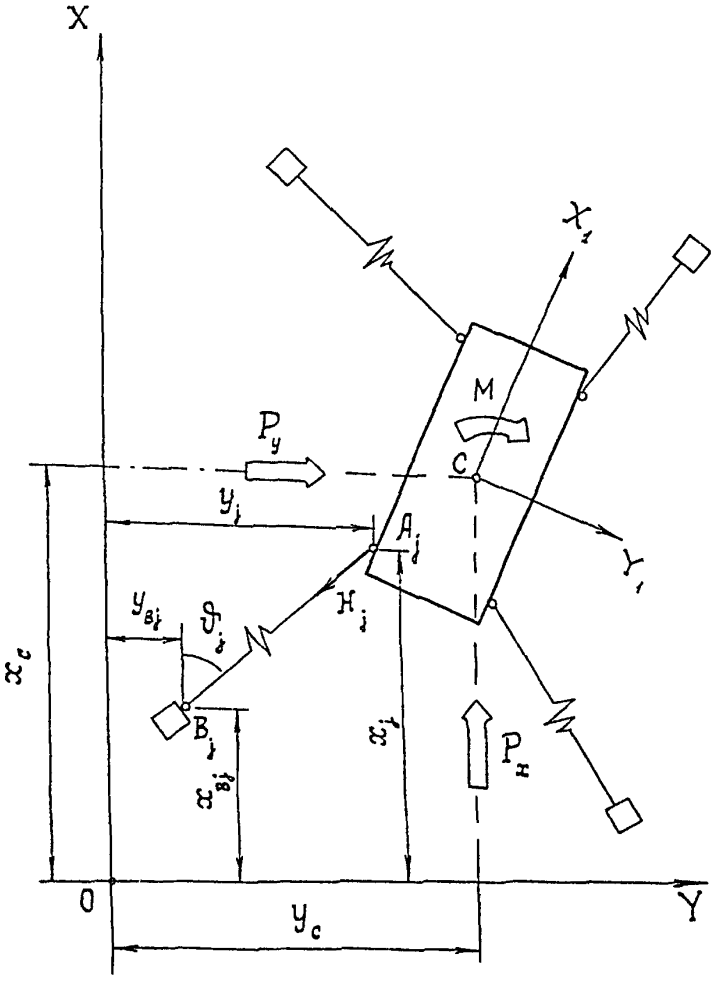


Рисунок Д.1 - Расчетная схема распределения усилий между якорными связями плавучего объекта в общем случае

M - вращающий горизонтальный момент внешних статических сил относительно точки С (см. рисунок Д.1);

x_j, y_j - координаты клюзовых опор j-й якорной связи в неподвижной системе координат OXY, связанные с перемещениями (координатами точки С в системе OXY) x_c, y_c, φ плавучего сооружения и координатами a_j, b_j клюзовых опор в подвижной системе координат CX_1Y_1 выражениями

$$\left.\begin{aligned} x_j &= x_c + a_j \cos\varphi - b_j \sin\varphi \\ y_j &= y_c + a_j \sin\varphi - b_j \cos\varphi \end{aligned}\right\}, \qquad (Д.2)$$

ϑ_j - угол между горизонтальной проекцией η_j j-й якорной связи и осью OX, вычисляемый из выражения

$$(x_j - x_{Bj})\operatorname{tg}\vartheta_j = (y_j - y_{Bj}), \qquad (Д.3)$$

x_{Bj}, y_{Bj} - координаты якоря j-й якорной связи в системе OXY.

Горизонтальная проекция η_j связана с координатами клюзовой опоры x_j, y_j выражением

$$\eta_j = \sqrt{(x_j - x_{Bj})^2 + (y_j - y_{Bj})^2}\,. \qquad (Д.4)$$

Систему уравнений (Д.1) с учетом (Д.2)-(Д.4) следует решать методом последовательных приближений.

При расчетах якорных систем плавучих гидротехнических сооружений, имеющих штанговое соединение с берегом, допускается считать штанги абсолютно жесткими конструкциями.

При соединении плавучего сооружения с берегом при помощи одинарной штанги распределение усилий между связями и перемещения объекта следует определять из решения системы уравнений

$$\left.\begin{aligned}\sum_{j=1}^{n} H_j\left[(x_j - x_c)\sin\vartheta_j - (y_j - y_o)\cos\vartheta_j\right] &= M_c\\ \sum_{j=1}^{n} H_j\left[x_j \sin\vartheta_j - y_j \cos\vartheta_j\right] &= M_0\end{aligned}\right\}, \qquad (Д.5)$$

где M_c, M_0 - вращающие горизонтальные моменты внешних статических сил относительно точек С и О (см. рисунок Д.2а).

Координаты x_c, y_c точки С сооружения связаны с углом поворота ψ в плане соединительной штанги выражениями

$$\left.\begin{aligned}x_o &= r(1 - \cos\psi)\\ y_o &= r\sin\psi\end{aligned}\right\}, \qquad (Д.6)$$

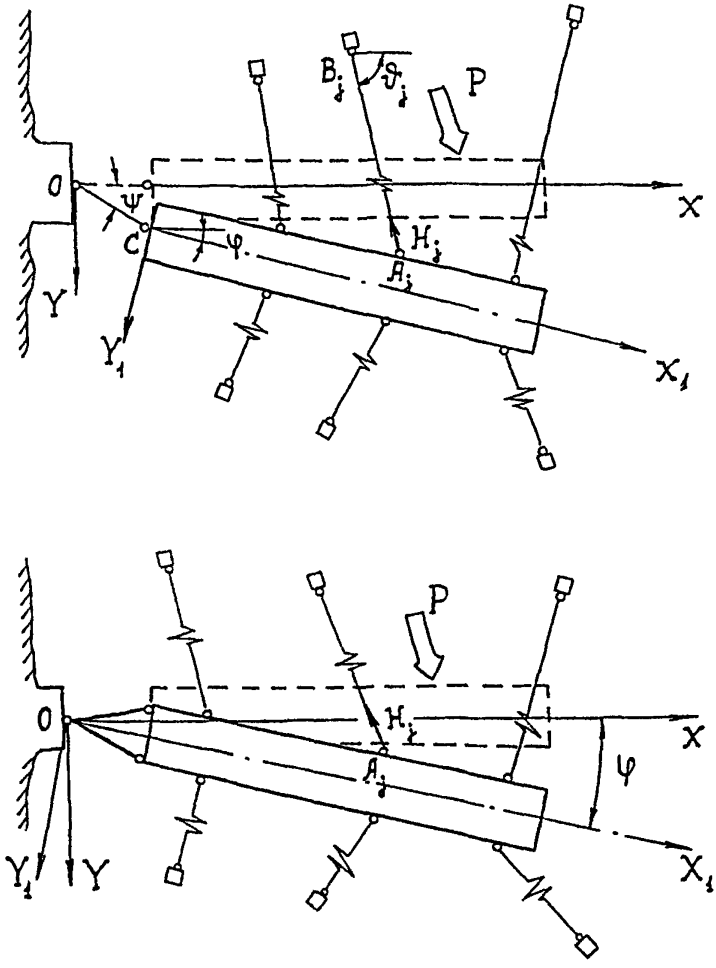
где r - горизонтальная проекция длины соединительной штанги.

Координаты клюзовых опор x_j, y_j, углы ϑ_j и горизонтальные проекции η_j определяются согласно выражениям (Д.2)-(Д.4).

Систему уравнений (Д.5) равновесия плавучего сооружения на якорях рекомендуется решать путем последовательных приближений.

При соединении плавучего гидротехнического сооружения с берегом при помощи V-образной штанги распределение усилий между связями следует определять из решения уравнения

$$\sum_{j=1}^{n} H_j\left[x_j \sin\vartheta_j - y_j \cos\vartheta_j\right] = M_0, \qquad (Д.7)$$



а - соединения сооружения с берегом при помощи одинарной штанги; б- соединение сооружения с берегом при помощи V-образной штанги

Рисунок Д.2 - Расчетные схемы распределения усилий между якорными связями плавучего сооружения

где M_0 - вращающий горизонтальный момент внешних статических сил относительно точки О (см. рисунок Д.2б);

x_j, y_j - координаты клюзовых опор, определяемые по формулам (Д.2), в которых следует полагать $x_c = y_c = 0$.

Величины ϑ_j и η_j определяются по формулам (Д.3) и (Д.4). Уравнение (Д.7) рекомендуется решать путем последовательных приближений или графически.

Для предварительной оценки работы якорной системы и для назначения количества якорных связей допускается определять внешнюю горизонтальную силу R, которая воспринимается отдельной якорной цепью или парой цепей, на участке сооружения выделенного для расчета по формуле

$$R = \frac{P}{n} m, \qquad (Д.8)$$

где P - расчетная поперечная или продольная внешняя нагрузка на плавучее гидротехническое сооружение;

n - количество якорных связей, участвующих в восприятии внешней нагрузки P;

m - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения усилий в якорных связях и принимаемый по таблице Д.1.

Таблица Д.1

Количество якорных связей n	Значения коэффициента m в зависимости от схемы раскрепления плавучего сооружения		
	сооружение не связано с берегом	сооружения связано с берегом одинарной штангой	сооружения связано с берегом V-образной штангой
2	1,1	1,1	1,1
4	1,3	1,2	1,15
≥6	1,45	1,35	1,25

Распределение внешней нагрузки между якорными связями при динамических воздействиях допускается определять по результатам расчетов колебаний плавучих объектов в соответствии с приложением В и с учетом жесткостных характеристик отдельных связей.

Наибольшие усилия в шарнирных соединениях и соединительных штангах плавучего объекта, как правило, возникают при волновых воздействиях в период штормового отстоя. Поэтому в большинстве случаев оценку этих усилий допускается производить без учета статических нагрузок.

Максимальные усилия в наиболее нагруженных шарнирных соединениях плавучего объекта (плавучего причала) допускается определять по формулам

$$S_x = \frac{1}{2}\sqrt{P_x^2 + \gamma_1\left(\frac{1}{c}\right)P_y^2 + N\left(\frac{M_z}{c}\right)^2},$$

$$S_y = \frac{1}{2}\sqrt{\gamma_2 P_y^2 + \frac{2{,}25}{N}\left(\frac{M_z}{l}\right)^2}, \qquad (Д.9)$$

$$S_z = \frac{1}{2}\sqrt{\gamma_3 P_z^2 + 4\gamma_4\left(\frac{M_y}{l}\right)^2 + \gamma_5\left(\frac{M_x}{l}\right)^2}.$$

где S_x, S_y, S_z - продольное поперечное и вертикальное усилия в шарнирах, кН;

P_x, P_y, P_z - амплитуды продольной, поперечной и вертикальной составляющей волновой нагрузки на секцию, кН;

M_x, M_y, M_z - амплитуды кренящего, дифферентующего и рыскающего момента от волнения на отдельную секцию, кН·м;

l - длина секции объекта (причала), м;

c - расстояние между центрами шарниров в плане, м;

$\gamma_1, \ldots \gamma_5$ - коэффициенты, учитывающие взаимовлияние колебаний секций и принимаемые в зависимости от количества N секций в причале по таблице Д.2.

Таблица Д.2

Количество секций	Значения коэффициентов				
	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
2	0	0,03	0,03	0,32	1,00
3	0,3	0,13	0,06	0,26	1,78
4	1,0	0,20	0,07	0,23	2,00
5	2,2	0,28	0,07	0,22	2,88
6 и более	4,0	0,34	0,07	0,22	3,56

Горизонтальную нагрузку N_x, кН, передаваемую плавучим объектам (причалам) через соединительные штанги на береговую опору в продольном по отношению к объекту направлении, допускается определять по формуле

$$N_x = k_д P_x \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{N} \sin\delta_{ij}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{N} \cos\delta_{ij}\right)^2}, \qquad (Д.10)$$

где k_d - коэффициент динамичности;

P_x - амплитуда продольной нагрузки на секцию, кН;

δ_{lj} - фазы продольных нагрузок на секции:
для головной секции $\delta_{ll} = 0$, а для других

$$\delta_{lj} = 2(j-1)\frac{\pi l}{\lambda}\cos\alpha;$$

j - номер секции начиная с головной;

l - длина секции, м;

λ - длина волны, м;

α - угол подхода волн к причалу.

Коэффициент динамичности следует вычислять по формуле

$$k_d = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{\sigma^2}{\omega^2}\right)^2 + 4\nu^2\frac{\sigma^2}{\omega^2}}}, \qquad (Д.11)$$

где σ - частота волн, с;

ω - частота собственных продольных колебаний объекта, с;

ν - безразмерный коэффициент затухания, который допускается принимать 0,1-0,2.

Собственную частоту продольных колебаний допускается определять по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad (Д.12)$$

где k - коэффициент жесткости соединительных штанг объекта в продольном направлении, кН/м;

m - приведенная масса объекта при продольных колебаниях, которую допускается принимать равной $m = 1{,}3 \cdot m_c \cdot N$, где m_c - масса секции кН·с/м, N - число секций.

Коэффициент жесткости k, кН/м, для V-образной соединительной штанги следует вычислять по формуле

$$K = 2K_1\left[1 - (r/l_1)^2\right], \qquad (Д.13)$$

где K_1 - коэффициент жесткости одной ветви штанги, кН/м;

r - расстояние в плане между продольной осью объекта (причала) и точкой крепления штанги к транцу корневой секции (понтона), м;

l_1 - длина штанги в недеформированном состоянии, м.

Усилие одинарной соединительной штанги принимается равным нагрузке N_x. Усилие S, кН, в отдельной ветви V-образной штанги находится по формуле

$$S = \frac{1}{2} N_x \sqrt{1 - (r/l_1)^2}\,. \qquad (Д.14)$$

Приложение Е

(справочное)

Примеры расчета якорных систем

Е.1 Статические расчеты якорных систем в плоской постановке задач

Пример 1

Требуется произвести расчет симметричной якорной системы плавучего сооружения с длинными цепями без подвесных грузов или плавучестей в предположении односторонней и двусторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепей в первоначальном состоянии (распор) H_1=98,07 кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну пару цепей (одна передняя и одна тыловая цепь) R=245,20 кН (25,00 тс);

вертикальная проекция свободных провисов цепей $\zeta = \overline{\zeta}$ =14,40м;

калибр передних и тыловых цепей 43 мм [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 719,81 кН (73,40 тс); разрывная нагрузка 1008,12 кН (102,80 тс); сила тяжести одного погонного метра цепи в воде $q = \overline{q}$ =0,3334кН/м (0,034 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = \overline{F}$ =0,0029м^2; модуль упругости цепи из условия, что при испытаниях пробной нагрузки удлинения смычек составляет 2,5% от первоначальной длины смычки, $E = \overline{E}$ =9913346 кПа (1010880 тс/м^2)];

длины цепей от клюзов до якорей $S = \overline{S}$ =175,00 м.

Расчет производится в соответствии с Б.2-Б.4.

Односторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии (внешняя нагрузка R отсутствует) параметр цепной линии по формуле (Б.1) имеет значение

$$a_1 = \frac{98,07}{0,3334} = 294,1176 \text{ м.}$$

Величина η_1^* вычисляется по формуле (Б.2)

$$\eta_1^* = 294,1176 \text{Arch}\left(1 + \frac{14,40}{294,1176}\right) = 91,6666 \text{ м.}$$

Горизонтальная проекция η_1 свободного провиса цепи определяется по формуле (Б.3)

$$\eta_1 = 91,6666 + \frac{98,07}{991336 \cdot 0,0029} 294,1176 \text{sh} \frac{91,6666}{294,1176} = 91,98433 \text{ м.}$$

Длина провиса цепи l_1 (длина участка A_1B_1 согласно рисунку Б.1) следует из формулы (Б.4)

$$l_1 = 294,1176 \text{sh} \frac{91,9843}{294,1176} = 93,4935 \text{ м.}$$

Из формулы (Б.5) вычисляется полное натяжение цепи в цепной опоре

$$T_1 = (14,40 + 294,1176) \cdot 0,3334 = 102,87 \text{ кН (10,49 тс).}$$

В рабочем состоянии (действует внешняя нагрузка R) горизонтальная составляющая натяжения цепи находится по формуле (Б.7)

$$H_2 = 98{,}07 + 245{,}20 = 343{,}27 \text{ кН (35,00 тс)}.$$

Величины $a_2, \eta_2^*, \eta_2, l_2, T_2$ определяются по формулам (Б.1)-(Б.5), в которых индекс 1 заменяется на индекс 2

$$a_2 = \frac{343{,}27}{0{,}3334} = 1029{,}4117 \text{м},$$

$$\eta_2^* = 11029{,}4117 \operatorname{Arch}\left(1 + \frac{14{,}40}{1029{,}4117}\right) = 171{,}9117 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 171{,}9117 + \frac{343{,}27}{991336 \cdot 0{,}0029} 1029{,}4117 \operatorname{sh} \frac{171{,}9117}{1029{,}4117} =$$
$$= 173{,}9737 \text{ м},$$

$$l_2 = 1029{,}4117 \operatorname{sh} \frac{173{,}9737}{1029{,}4117} = 174{,}8044 \text{ м},$$

$$T_2 = (1029{,}4117 + 14{,}40) \cdot 0{,}3334 = 348{,}04 \text{ кН (35,49 тс)}.$$

Горизонтальное перемещение u сооружения вычисляется по формуле (Б.8)

$$u = \left(2294{,}1176\,\mathrm{sh}\,\frac{91{,}6666}{294{,}1176} - 91{,}6666\right) - \left(1029{,}4117\,\mathrm{sh}\,\frac{171{,}9117}{1029{,}4117} - 171{,}9117\right) + \frac{175{,}00 \cdot 245{,}20}{0{,}0029 \cdot 9913346} = 2{,}16 \text{ м}.$$

Двусторонняя работа якорной системы

Выполненные ранее расчеты цепей в первоначальном состоянии остаются в силе.

В рабочем состоянии параметры $a_1, \bar{a}_2$ цепных линий передней и тыловой цепей определяются из системы уравнений (Б.9) с учетом выражений (Б.10)-(Б.14), которые для симметричной схемы раскрепления приводятся к виду

$$a_2 = \bar{a}_2 = \frac{R}{q},$$

$$\sqrt{a_2} + \sqrt{\bar{a}_2} - \sqrt{a_2\bar{a}_2}(a_2 + \bar{a}_2)\sigma = (\kappa - \psi)\sqrt{a_2\bar{a}_2},$$

где $\sigma = \dfrac{3qS}{\sqrt{2}\zeta\sqrt{\zeta EF}}$,

$$k = \frac{2}{\sqrt{a_1}},$$

$$\psi = 2a_1\sigma,$$

$$\chi = 1.$$

Величины σ, k, ψ согласно приведенным выше формулам имеют значения

$$\sigma = \frac{3 \cdot 0{,}3334 \cdot 175{,}0}{\sqrt{2} \cdot 14{,}40\sqrt{14{,}40} \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029} = 0{,}787 \cdot 10^{-4} \text{м}^{-\frac{2}{3}},$$

$$k = \frac{2}{\sqrt{294{,}1176}} = 0{,}1166 \text{ м}^{-\frac{1}{2}},$$

$$\psi = 2 \cdot 294{,}1176 \cdot 0{,}787 \cdot 10^{-4} = 0{,}0463 \text{ м}^{-\frac{1}{2}}.$$

Решение уравнений для $a_2, \bar{a}_2$ подбором в табличной форме дает

$a_2 = 822{,}5591$ м,

$\bar{a}_2 = 87{,}2650$ м.

Горизонтальные нагрузки на якоря определяются по формулам (Б.15), (Б.16)

$H_2 = 0{,}3334 \cdot 822{,}5591 = 274{,}29$ кН (27,97 тс),

$\bar{H}_2 = 0{,}3334 \cdot 87{,}2650 = 29{,}12$ кН (2,97 тс).

Характеристики передней цепи $\eta_2^*, \eta_2, l_2, T_2$ вычисляются по формулам (Б.2)-(Б.5), в которых индекс 1 заменяется на 2

$$\eta_2^* = 822{,}5591 \operatorname{Arch}\left(1 + \frac{14{,}40}{822{,}5591}\right) = 153{,}8185 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 153{,}8185 + \frac{274{,}29 \cdot 822{,}5591}{991336 \cdot 0{,}0029} \operatorname{sh}\frac{153{,}8185}{822{,}5591} =$$

$$= 155{,}2945 \text{ м},$$

$$l_2 = 822{,}5591 \operatorname{sh}\frac{155{,}2945}{822{,}5591} = 156{,}2122 \text{ м},$$

$$T_2 = (822{,}5591 + 14{,}40) \cdot 0{,}3334 = 279{,}04 \text{ кН } (28{,}45 \text{ тс}).$$

Аналогичные расчеты для тыловой цепи приводят к результатам

$$\overline{\eta}_2^* = 87{,}2650 \operatorname{Arch}\left(1 + \frac{14{,}40}{87{,}2650}\right) = 49{,}4792 \text{ м},$$

$$\overline{\eta}_2 = 49{,}4792 + \frac{29{,}12 \cdot 87{,}2650}{9913346 \cdot 0{,}0029} \operatorname{sh}\frac{49{,}4792}{87{,}2650} = 49{,}5320 \text{ м},$$

$$l_2 = 87{,}2650 \operatorname{sh}\frac{49{,}5320}{87{,}2650} = 52{,}2342 \text{ м},$$

$$T_2 = (87{,}2650 + 14{,}40) \cdot 0{,}3334 = 33{,}88 \text{ кН } (3{,}45 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение u сооружения находится по формуле (Б.8), в которую подставляются значения характеристик передней цепи

$$u = \left(294{,}1176\,\mathrm{sh}\frac{91{,}6666}{294{,}1176} - 91{,}6666\right) - \left(822{,}5591\,\mathrm{sh}\frac{153{,}8185}{822{,}5591} - 153{,}8185\right) + \\ + \frac{175{,}00 \cdot 245{,}20}{0{,}0029 \cdot 9913346} \times (274{,}29 - 98{,}07) = 1{,}6510 \text{ м},$$

Из данного примера следует, что при расчетах длинных цепей в предположении односторонней и двусторонней работы могут получаться существенно отличающиеся результаты. Поэтому расчеты длинных цепей желательно выполнять с учетом двусторонней работы якорной системы.

Пример 2

Требуется произвести расчет якорной системы плавучего сооружения с длинными цепями и подвесными грузами или плавучестями в предположении односторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор) H_1=98,07 кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну пару цепей (одна передняя и одна тыловая цепь) R=441,30 кН (45,00 тс);

сила тяжести (вес) в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести G=196,13 кН (20,00 тс);

длина верхнего участка цепи S_0=50,00 м;

длина нижнего участка цепи S^*=425,00 м;

вертикальная проекция свободного провиса цепи ζ=150,00 м;

калибр цепей 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059,40 кН (210,40 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде $q = q^* = 1{,}0886$ кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = F^* = 0{,}0093$ м^2; модуль упругости цепи $E = E^* = 8846196$ кПа (902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с Б.5-Б.7.

Якорная цепь с подвесным грузом

Так как в первоначальном состоянии $q = q^*$, то $a_1 = a_1^*$ (внешняя нагрузка R отсутствует) параметр a_1, определяемый по формуле (Б.18) имеет значение

$$a_1 = \frac{98,07}{1,0886} = 90,0901 \text{ м.}$$

Величины $\eta_{1c}^*, x_{1C}, x_{1A}$ определяются из уравнения (Б.20) подбором с использованием соотношений (Б.21), (Б.22).

$\eta_{1c}^* = 124,9230$ м,

$x_{1C} = 185,9586$ м,

$x_{1A} = 197,6769$ м.

Величины η_1^*, l_1^* по формулам (Б.25), (Б.26)

$$\eta_1^* = 124,9230 + 197,6769 - 185,9586 = 136,6413 \text{ м,}$$

$$l_1^* = 50,00 + 90,0901 \operatorname{sh} \frac{124,9230}{90,0901} = 218,9878 \text{ м.}$$

Горизонтальная η_{1C} и вертикальная ζ_{1C} проекции свободного провиса нижнего участка цепи следуют из формул (Б.27), (Б.28)

$$\eta_{1c} = 124{,}9230 + \frac{98{,}07 \cdot 90{,}0901}{0{,}0093 \cdot 8846196} \operatorname{sh} \frac{124{,}9230}{90{,}0901} = 125{,}1242 \text{ м},$$

$$\zeta_{1c} = 90{,}0901 \left(\operatorname{ch} \frac{124{,}9230}{90{,}0901} - 1 \right) = 101{,}4086 \text{ м}.$$

Горизонтальная проекция η_1 и длина свободного провиса l_1 всей цепи определяется по формулам (Б.29), (Б.30)

$$\eta_1 = 136{,}6413 + \frac{98{,}07 \cdot 90{,}0901}{0{,}0093 \cdot 8846196} \operatorname{sh} \frac{124{,}9230}{09{,}0901} +$$
$$+ \frac{98{,}07 \cdot 50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 136{,}902 \text{ м},$$

$$l_1 = 50{,}00 + 90{,}0901 \operatorname{sh} \frac{125{,}1242}{90{,}0901} = 219{,}4414 \text{ м}.$$

По формулам (Б.31), (Б.32) находятся усилия в цепи в клюзовой точке

$$T_{1A} = 98{,}07 \operatorname{ch} \frac{199{,}6769}{90{,}0901} = 445{,}42 \text{ кН } (45{,}42 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07 \operatorname{sh} \frac{197{,}6769}{90{,}0901} = 434{,}53 \text{ кН } (44{,}31 \text{ тс}).$$

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь вычисляется по формуле (Б.35)

$H_2 = 98{,}07 + 441{,}30 = 539{,}37$ кН (55,00 тс).

Геометрические и силовые характеристики якорной цепи определяются по формулам (Б.18)-(Б.34), в которых индекс 1 заменяется индексом 2:

параметры a_2, a_2^* по (Б.18) ($q = q^*$)

$$a_2 = a_2^* = \frac{539{,}37}{1{,}0886} = 495{,}4955 \text{ м};$$

величины $\eta_{2C}^*, x_{2A}, x_{2C}$ из уравнений (Б.20)-(Б.22)

$\eta_{2C}^* = 328{,}0400$ м,

$x_{2A} = 495{,}7273$ м,

$x_{2C} = 462{,}5113$ м;

величины η_2^*, l_2^* по формулам

$\eta_2^* = 328{,}0400 + 495{,}7273 - 462{,}5113 = 361{,}2560$ м,

$$l_2^* = 50{,}00 + 495{,}4955 \operatorname{sh} \frac{328{,}0400}{495{,}4955} = 402{,}4831 \text{ м};$$

горизонтальная η_{2C} и вертикальная ζ_{2C} проекции провиса нижнего участка цепи, а также горизонтальная проекция η_2 и длина l_2 провиса всей цепи по формулам (Б.27)-(Б.30)

$$\eta_{2c} = 328{,}0400 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{0{,}0093 \cdot 8846196}\,\mathrm{sh}\,\frac{328{,}0400}{495{,}4955} = 330{,}3477 \text{ м},$$

$$\zeta_{2c} = 495{,}4955\left(\mathrm{ch}\,\frac{328{,}0400}{495{,}4955} - 1\right) = 112{,}5835 \text{ м};$$

$$\eta_2 = 361{,}2560 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{0{,}0093 \cdot 8846196}\,\mathrm{sh}\,\frac{328{,}0400}{495{,}4955} + \\ + \frac{539{,}37 \cdot 50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 363{,}8910 \text{ м},$$

$$l_2 = 50{,}00 + 495{,}4955\,\mathrm{sh}\,\frac{330{,}3477}{495{,}4955} = 405{,}3693 \text{ м};$$

усилия в цепи в клюзовой точке по формулам (Б.31), (Б.32)

$$T_{2A} = 539{,}37\,\mathrm{ch}\,\frac{495{,}7273}{495{,}4955} = 832{,}58 \text{ кН } (84{,}90 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\,\mathrm{sh}\,\frac{495{,}7273}{495{,}4955} = 634{,}29 \text{ кН } (64{,}68 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение сооружения u вычисляется по формуле (Б.36)

$$u = (218{,}9878 - 136{,}6413) - (402{,}4831 - 361{,}2560) + \\ + 441{,}30\left(\frac{425{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} + \frac{50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 43{,}6638 \text{ м}.$$

Якорная цепь с плавучестью

Здесь исходные данные те же, что и в случае цепи с грузом. Символом G обозначена выталкивающая сила закрепленной на цепи плавучести. Принято G =196,13 кН (20,00 тс).

В первоначальном состоянии q = q*, то $a_1 = a_1^*$, параметр a_1 согласно формуле (Б.18) имеет значение

a_1=90,0901 м.

Величины $\eta_{1c}^*, x_{1C}, x_{1A}$ определяются из уравнения (Б.20) методом подбора с использованием соотношений (Б.21), (Б.22)

η_{1c}^*= 138,2370 м,

x_{1c} = 63,6324 м,

x_{1A} = 18,9174 м.

Для величин η_1^*, l_1^* из выражений (Б.25), (Б.26) следует

η_1^* = 182,9520 м,

l_1^* = 249,2371 м.

По формулам (Б.27), (Б.28) вычисляются горизонтальная и вертикальная проекции провиса нижнего участка цепи

$\eta_{1C} = 138{,}4742$ м,

$\zeta_{1C} = 128{,}5717$ м.

Горизонтальная проекция и длина всей цепи определяются по формулам (Б.29), (Б.30)

$$\eta_1 = 182{,}9520 + \frac{98{,}07 \cdot 90{,}0901}{0{,}0093 \cdot 8846196}\,\mathrm{sh}\frac{138{,}2370}{90{,}0901} + \\ + \frac{98{,}07 \cdot 50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 183{,}2487 \text{ м},$$

$$l_1 = 50{,}00 + 90{,}0901\,\mathrm{sh}\frac{138{,}4742}{90{,}0901} = 249{,}8018 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке и в узле крепления плавучести рассчитываются согласно формулам (Б.31)-(Б.34)

$$T_{1A} = 98{,}07\,\mathrm{ch}\frac{63{,}6324}{90{,}0901} = 123{,}56 \text{ кН } (12{,}60 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\,\mathrm{sh}\frac{63{,}6324}{90{,}0901} = 74{,}92 \text{ кН } (7{,}64 \text{ тс}),$$

$$T_{1C} = 98{,}07\,\mathrm{ch}\frac{138{,}2370}{90{,}0901} = 238{,}01 \text{ кН } (24{,}27 \text{ тс}),$$

$$V_{1C} = 98{,}07\,\mathrm{sh}\frac{138{,}2340}{90{,}0901} = 216{,}92 \text{ кН } (22{,}12 \text{ тс}).$$

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь вычисляется по формуле (Б.35)

H_2=539,37 кН (55,00 тс).

Геометрические и силовые характеристики якорной цепи определяются по формулам (Б.18)-(Б.34), в которых индекс 1 заменяется на 2. Для параметров a_2, a_2^* из выражений (Б.18)-(Б.34) следует

$a_2 = a_2^*$=495,4955 м.

Величины $\eta_2^*, x_{2C} x2_{1A}$ определяются из уравнений (Б.20)-(Б.22)

η_{2C}^*= 350,6154 м,

x_{2C} = 195,3381 м,

x_{2A} = 240,8395 м.

Для величин η_2^*, l_2^* расчет проводится по формулам (Б.25), (Б.26)

η_2^* = 396,1168 м,

l_2^* = 430,6158 м.

Значения горизонтальной и вертикальной проекций провиса нижнего участка цепи определяются по формулам (Б.27), (Б.28)

$\eta_{2C} = 353{,}11073$ м,

$\zeta_{2C} = 129{,}3124$ м.

Горизонтальная проекция и длина свободного провиса всей цепи, определяемые по формулам (Б.29), (Б.30) имеют значения

$$\eta_2 = 396{,}1168 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{0{,}0093 \cdot 8846196}\,\mathrm{sh}\,\frac{350{,}6154}{495{,}4955} + \\ + \frac{539{,}37 \cdot 50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 398{,}9360 \text{ м},$$

$$l_2 = 50{,}00 + 495{,}4955\,\mathrm{sh}\,\frac{353{,}1073}{495{,}4955} = 433{,}7612 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке и в точке крепления плавучести находятся по формулам (Б.31)-(Б.34)

$$T_{2A} = 539{,}37\,\mathrm{ch}\,\frac{240{,}8395}{4495{,}4955} = 604{,}38 \text{ кН } (61{,}63 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\,\mathrm{sh}\,\frac{240{,}8395}{4495{,}4955} = 272{,}62 \text{ кН } (27{,}80 \text{ тс}),$$

$$T_{2C} = 539{,}37\,\mathrm{ch}\,\frac{350{,}6154}{495{,}4955} = 680{,}01 \text{ кН } (69{,}35 \text{ тс}),$$

$$V_{2C} = 539{,}37\,\mathrm{sh}\,\frac{350{,}6154}{495{,}4955} = 414{,}33 \text{ кН } (42{,}25 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение сооружения u вычисляется по формуле (Б.36)

$$u = (249{,}2371 - 182{,}9520) - (430{,}6158 - 396{,}1168) + \\ + 441{,}30\left(\frac{425{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} + \frac{50{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 34{,}3305 \text{ м.}$$

Из анализа результатов расчета в настоящем примере следует, что якорная цепь с плавучестью при одинаковых исходных данных, испытывает значительно меньшие нагрузки, по сравнению с цепью с подвешенным грузом. При применении цепей с плавучестями существенно уменьшаются вертикальные нагрузки на плавучий объект и перемещения объекта. В целом имеет место разгружающий эффект плавучести.

Пример 3

Требуется произвести расчет симметричной якорной системы плавучего сооружения с короткими цепями без подвесных грузов или плавучестей в предположении односторонней и двусторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепей в первоначальном состоянии (распор) H_1=98,07 кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну пару цепей (одна передняя и одна тыловая цепь) R=294,20 кН (30,00 тс);

вертикальная проекция свободных провисов цепей $\zeta = \overline{\zeta} = 100{,}0$м;

длины цепей от клюзов до якорей $S = \overline{S} = 215{,}00$ м;

калибр передних и тыловых цепей 43 мм [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 719,81 кН (73,40 тс); разрывная нагрузка 1008,12 кН (102,80 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде

$q = \overline{q} = 0{,}3334$ кН/м (0,034 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = \overline{F} = 0{,}0029 м^2$; модуль упругости цепи из условия, что при испытаниях пробной нагрузки удлинения смычек составляет 2,5% от первоначальной длины смычки, $E = \overline{E} = 9913346$ кПа (1010880 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с Б.8–Б.10.

Односторонняя работа якорной системы

В первоначальном состоянии параметр цепной линии a_1 определяется из выражения (Б.37)

$$a_1 = \frac{98{,}07}{0{,}3334} = 294{,}1176 \text{ м}.$$

Величины η_1^*, x_{1B}, x_{1A} вычисляются по формулам (Б.38)-(Б.40)

$$\eta_1^* = 2 \cdot 294{,}1176 \operatorname{Arcsh} \frac{\sqrt{215{,}00^2 - 100{,}00^2}}{2 \cdot 294{,}1176} = 187{,}1528 \text{ м},$$

$$x_{1B} = 294{,}1176 \operatorname{Arth} \frac{100{,}00}{215{,}00} - \frac{1}{2} \cdot 187{,}1528 = 54{,}6053 \text{ м},$$

$$x_{1A} = 54{,}6053 + 187{,}1528 = 241{,}7581 \text{ м}.$$

Горизонтальная проекция η_1 провиса цепи следует из формулы (Б.41)

$$\eta_1 = 187{,}1528 + \frac{98{,}07 \cdot 215{,}00}{9913346 \cdot 0{,}0029} = 187{,}8860 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке и нагрузки на якорь определяются по формулам (Б.41)-(Б.45)

$$T_{1A} = 98{,}07\,\mathrm{ch}\frac{241{,}7581}{294{,}1176} = 133{,}08 \text{ кН } (13{,}57 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\,\mathrm{sh}\frac{241{,}7581}{294{,}1176} = 90{,}03 \text{ кН } (9{,}18 \text{ тс}),$$

$$T_{1B} = 8{,}07\,\mathrm{ch}\frac{54{,}6053}{294{,}1176} = 99{,}73 \text{ кН } (10{,}17 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 98{,}07\,\mathrm{sh}\frac{54{,}6053}{294{,}1176} = 18{,}34 \text{ кН } (1{,}87 \text{ тс}).$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь H_1=98,07 кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь по формуле (Б.46)

H_1=98,07+294,20=392,27 кН (40,00 тс).

Геометрические и силовые характеристики цепи определяются по формулам (Б.37)-(Б.45), в которых индекс 1 заменяется на 2

$$a_1 = \frac{392{,}27}{0{,}3334} = 1176{,}4705 \text{ м},$$

$$\eta_2^* = 2 \cdot 1176{,}4705\,\mathrm{Arsh}\frac{\sqrt{215{,}00^2 - 100{,}00^2}}{2 \cdot 1176{,}4705} = 190{,}1152 \text{ м},$$

$$x_{2B} = 1176{,}4705 \operatorname{Arth}\frac{100{,}00}{215{,}00} - \frac{1}{2} \cdot 190{,}1152 = 497{,}6694 \text{ м},$$

$$x_{2A} = 497{,}6694 + 190{,}1152 = 687{,}7846 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 190{,}1152 + \frac{392{,}27 \cdot 215{,}00}{9913346 \cdot 0{,}0029} = 193{,}0483 \text{ м},$$

$$T_{2A} = 392{,}27 \operatorname{ch}\frac{687{,}7846}{1176{,}4705} = 461{,}21 \text{ кН } (47{,}03 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 392{,}27 \operatorname{sh}\frac{687{,}7846}{1176{,}4705} = 242{,}62 \text{ кН } (24{,}74 \text{ тс}),$$

$$T_{2B} = 392{,}27 \operatorname{ch}\frac{497{,}6694}{1176{,}4705} = 427{,}86 \text{ кН } (43{,}63 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 392{,}27 \operatorname{sh}\frac{497{,}6694}{1176{,}4705} = 170{,}93 \text{ кН } (17{,}43 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение сооружения u вычисляется по формуле (Б.47)

$$u = 193{,}04483 - 187{,}8860 = 5{,}1623 \text{ м}.$$

Двусторонняя работа якорной системы

Выполненные ранее расчеты цепей в первоначальном состоянии остаются в силе.

В рабочем состоянии параметры $a_2, \overline{a}_2$ цепных линий для передней и тыловой цепей определяются из решения уравнений (Б.48) с учетом выражений (Б.49)-(Б.55)

$$a_2 = 1064{,}5649 \text{ м},$$

$$\overline{a}_2 = 182{,}2120 \text{ м}.$$

Горизонтальные нагрузки на якоря (распоры в цепях) вычисляются по формулам (Б.56), (Б.57)

$$H_2 = 0{,}3334 \cdot 11064{,}5649 = 355{,}00 \text{ кН } (36{,}20 \text{ тс}),$$

$$\overline{H}_2 = 0{,}3334 \cdot 182{,}2120 = 60{,}80 \text{ кН } (6{,}20 \text{ тс}).$$

Далее расчеты производятся раздельно для передней и тыловой цепей. Геометрические и силовые характеристики передней цепи вычисляются по формулам (Б.38)-(Б.45), в которых индекс 1 заменяется индексом 2

$$\eta_2^* = 2 \cdot 1064{,}5649 \operatorname{Arsh} \frac{\sqrt{215{,}00^2 - 100{,}00^2}}{2 \cdot 1064{,}5649} = 190{,}0716 \text{ м},$$

$$x_{2B} = 1064{,}5649 \operatorname{Arth} \frac{100{,}00}{215{,}00} - \frac{1}{2} \cdot 190{,}0716 = 441{,}3111 \text{ м},$$

$$x_{2A} = 441{,}3111 + 190{,}0716 = 631{,}3827 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 190{,}0716 + \frac{355{,}00 \cdot 215{,}00}{9913346 \cdot 0{,}0029} = 192{,}7263 \text{ м},$$

$$T_{2A} = 355{,}00 \operatorname{ch} \frac{631{,}3827}{1064{,}5649} = 419{,}33 \text{ кН } (42{,}76 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 355{,}00 \operatorname{sh} \frac{631{,}3827}{1064{,}5649} = 223{,}10 \text{ кН } (22{,}75 \text{ тс}),$$

$$T_{1B} = 355{,}00 \operatorname{ch} \frac{441{,}3111}{1064{,}5649} = 385{,}99 \text{ кН } (39{,}36 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 355{,}00 \operatorname{sh} \frac{441{,}3111}{1064{,}5649} = 151{,}41 \text{ кН } (15{,}44 \text{ тс}).$$

Аналогично расчеты тыловой цепи приводят к результатам

$$\overline{\eta}_2^* = 2 \cdot 182{,}212 \operatorname{Arsh} \frac{\sqrt{215{,}00^2 - 100{,}00^2}}{2 \cdot 182{,}212} = 182{,}5931 \text{ м},$$

$$\overline{x}_{2B} = 182{,}212 \operatorname{Arth} \frac{100{,}00}{215{,}00} - \frac{1}{2} \cdot 182{,}212 = 0{,}3947 \text{ м},$$

$$\overline{x}_{2A} = 0{,}3947 + 182{,}5931 = 182{,}9878 \text{ м},$$

$$\overline{\eta}_2 = 182{,}5931 + \frac{6{,}20 \cdot 215{,}00}{9913346 \cdot 0{,}0029} = 183{,}0476 \text{ м}.$$

$$\overline{T}_{2A} = 60{,}80 \operatorname{ch} \frac{182{,}9878}{182{,}212} = 94{,}14 \text{ кН } (9{,}60 \text{ тс}),$$

$$\overline{V}_{2A} = 60{,}80\,\mathrm{sh}\frac{182{,}9878}{182{,}212} = 71{,}88 \text{ кН (7,33 тс)},$$

$$\overline{T}_{2B} = 60{,}80\,\mathrm{ch}\frac{0{,}3947}{182{,}212} = 60{,}80 \text{ кН (6,20 тс)},$$

$$\overline{V}_{2B} = 60{,}80\,\mathrm{sh}\frac{0{,}3947}{182{,}212} = 0{,}10 \text{ кН (0,01 тс)}.$$

Горизонтальное перемещение сооружения u определяется по формуле (Б.47), в которую подставляются значения характеристик передней цепи

$$u = 192{,}7263 - 187{,}8860 = 4{,}8403 \text{ м}.$$

Пример 4

Требуется произвести расчет якорной системы плавучего сооружения с короткими цепями и с подвесными грузами или плавучестями в предположении односторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор) H_1=98,07 кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну цепь R=441,30 кН (45,00 тс);

сила тяжести (вес) в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести G=196,13 кН (20,00 тс);

длина верхнего участка цепи S_0=50,00 м;

длина нижнего участка цепи от груза или плавучести до якоря S^*=150,00 м;

вертикальная проекция свободного провиса цепи ζ=150,00 м;

калибр цепей 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059,40 кН (210,40 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде $q = q^* = 1{,}0886$ кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = F^* = 0{,}0093 м^2$; модуль упругости цепи $E = E^* = 8846196$ кПа 902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с Б.11-Б.13.

Якорная цепь с подвесным грузом

Так как в первоначальном состоянии (внешняя нагрузка R отсутствует) $q = q^*$, то $a_1 = a_1^*$, параметр a_1 по формуле (Б.59) равен

$$a_1 = \frac{98{,}07}{1{,}0886} = 90{,}0901 \text{ м}.$$

Величины $x_{1C}^*, x_{1B}^*, x_{1C}, x_{1A}$ определяются из уравнения (Б.61) подбором с использованием соотношений (Б.62)-(Б.64)

$x_{1C}^* = 126{,}2906$ м,

$x_{1B}^* = 21{,}7023$ м,

$x_{1C} = 186{,}6854$ м,

$x_{1A} = 198{,}3189$ м.

Для величин η_{1C}^*, η_1^* расчеты по формулам (Б.67), (Б.68) дают

$$\eta_{1C}^{*} = 126{,}29006 - 21{,}7023 = 104{,}5883 \text{ м},$$

$$\eta_{1}^{*} = 104{,}5883 + (198{,}3189 - 186{,}6854) = 116{,}2218 \text{ м}.$$

Горизонтальная η_{1C} и вертикальная ζ_{1C} проекции свободного провиса нижнего участка цепи, а также горизонтальная проекция η_1 провиса всей цепи следует из формул (Б.69)-(Б.71)

$$\eta_{1C} = 104{,}5883 + \frac{98{,}07 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 104{,}7669 \text{ м},$$

$$\zeta_{1C} = 90{,}0901\left(\operatorname{ch}\frac{126{,}2906}{90{,}0901} - \operatorname{ch}\frac{21{,}7323}{90{,}0901}\right) = 101{,}3704 \text{ м},$$

$$\eta_1 = 116{,}2218 + \frac{98{,}07 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} + \frac{98{,}07 \cdot 50{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 116{,}4599 \text{ м}.$$

Усилия в клюзовой точке цепи определяются по формулам (Б.72), (Б.73)

$$T_{1A} = 98{,}07\operatorname{ch}\frac{198{,}3189}{90{,}0901} = 448{,}56 \text{ кН } (45{,}74 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\operatorname{sh}\frac{198{,}3189}{90{,}0901} = 437{,}67 \text{ кН } (44{,}63 \text{ тс}).$$

Натяжение цепи в точке крепления к якорю и вертикальная составляющая усилия на якорь рассчитываются по формулам (Б.76), (Б.77)

$$T_{1B} = 98{,}07\operatorname{ch}\frac{21{,}7023}{90{,}0901} = 100{,}93 \text{ кН } (10{,}29 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 98{,}07\,\mathrm{sh}\frac{21{,}7023}{90{,}0901} = 23{,}83 \text{ кН (2,43 тс).}$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь H_1=98,07 кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь вычисляется по формуле (Б.78)

$$H_1 = 98{,}07 + 441{,}30 = 539{,}37 \text{ кН (55,00 тс).}$$

Геометрические и силовые характеристики цепи определяются по формулам (Б.59)-(Б.77), в которых индекс 1 заменяется на 2

$$a_2 = a_2^* = \frac{539{,}37}{1{,}0886} = 495{,}4955 \text{ м,}$$

$$x_{2C}^* = 499{,}1375 \text{ м,}$$

$$x_{2B}^* = 394{,}8157 \text{ м,}$$

$$x_{2C} = 605{,}6352 \text{ м,}$$

$$x_{2A} = 632{,}1323 \text{ м.}$$

$$\eta_{2C}^* = 499{,}1375 - 394{,}8157 = 104{,}3218 \text{ м,}$$

$$\eta_2^* = 104{,}3218 + (632{,}1323 - 605{,}6352) = 130{,}8189 \text{ м,}$$

$$\eta_{2C} = 104{,}3218 + \frac{539{,}37 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 105{,}3038 \text{ м},$$

$$\zeta_{2C} = 495{,}4955\left(\operatorname{ch}\frac{499{,}1375}{495{,}4955} - \operatorname{ch}\frac{394{,}8157}{495{,}4955}\right) = 107{,}5765 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 130{,}8189 + \frac{9539{,}37 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} + \frac{539{,}37 \cdot 50{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 132{,}1283 \text{ м},$$

$$T_{2A} = 539{,}37\operatorname{ch}\frac{632{,}1323}{495{,}4955} = 1041{,}17 \text{ кН } (106{,}17 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\operatorname{sh}\frac{632{,}1323}{495{,}4955} = 890{,}54 \text{ кН } (90{,}81 \text{ тс}),$$

$$T_{2B} = 539{,}37\operatorname{ch}\frac{394{,}8157}{495{,}4955} = 719{,}84 \text{ кН } (73{,}40 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 539{,}37\operatorname{sh}\frac{394{,}8157}{495{,}4955} = 476{,}70 \text{ кН } (48{,}61 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение сооружения u определяется по формуле (Б.79)

$$u = 132{,}1283 - 116{,}4599 = 15{,}6684 \text{ м}.$$

Якорная цепь с плавучестью

Здесь исходные данные те же , что и в случае цепи с подвесным грузом. Символом G обозначена выталкивающая сила закрепленной на цепи плавучести. Принято G =196,13 кН (20,00 тс).

Так как в первоначальном состоянии $q = q^*$, то $a_1 = a_1^*$, параметр цепной линии согласно формуле (Б.59) имеет значение

a_1=90,0901 м.

Величины $x_{1C}^*, x_{1B}^*, x_{1A}, x_{1C}$ определяются подбором из уравнения (Б.61) с использованием соотношений (Б.62)-(Б.64)

x_{1C}^* = 144,9916 м,

x_{1B}^* = 61,3576 м,

x_{1C} = 35,1351 м,

x_{1A} = 76,5012 м.

Для величин η_{1C}^*, η_1^* из выражений (Б.67), (Б.68) следует

η_{1C}^* = 83,6340 м,

η_1^* = 125,0001 м.

Горизонтальная и вертикальная проекция свободного провиса нижнего участка цепи вычисляются по формулам (Б.69), (Б.70)

$$\eta_{1C} = 83{,}6340 + \frac{98{,}07 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 83{,}8126 \text{ м},$$

$$\zeta_{1C} = 90{,}0901\left(\operatorname{ch}\frac{144{,}9916}{90{,}0901} - \operatorname{ch}\frac{61{,}3576}{90{,}0901}\right) = 122{,}4183 \text{ м}.$$

В соответствии с формулой (Б.71) горизонтальная проекция всей цепи

$$\eta_1 = 125{,}0001 + \frac{98{,}07 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} + \frac{98{,}07 \cdot 50{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 125{,}2382 \text{ м}.$$

Для усилий в клюзовой точке цепи из выражений (Б.72), (Б.73) получено

$$T_{1A} = 98{,}07\operatorname{ch}\frac{76{,}5012}{90{,}0901} = 135{,}63 \text{ кН } (13{,}83 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\operatorname{sh}\frac{76{,}5012}{90{,}0901} = 93{,}65 \text{ кН } (9{,}55 \text{ тс}).$$

Усилия в цепи в точке крепления плавучести определяются согласно формулам (Б.74), (Б.75)

$$T_{1C} = 98{,}07\operatorname{ch}\frac{144{,}9916}{90{,}0901} = 254{,}97 \text{ кН } (26{,}00 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\operatorname{sh}\frac{144{,}9916}{90{,}0901} = 235{,}36 \text{ кН } (24{,}00 \text{тс}).$$

Нагрузка на якорь вычисляется по формулам (Б.76), (Б,77)

$$T_{1B} = 98{,}07 \operatorname{ch} \frac{61{,}3576}{90{,}0901} = 121{,}71 \text{ кН } (12{,}41 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 98{,}07 \operatorname{sh} \frac{61{,}3576}{90{,}0901} = 72{,}08 \text{ кН } (7{,}35 \text{ тс}).$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь H_1=98,07 кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь по формуле (Б.78) H_2=539,37 кН (55,00 тс).

Геометрические и силовые характеристики цепи определяются по формулам (Б.59)-(Б.77), в которых индекс 1 заменен на индекс 2.

Расчет параметров цепных линий по формулам (Б.59), Б.60) дает

$a_1 = a_2^* = 495{,}4955$ м.

Величины $x_{2C}^*, x_{2B}^*, x_{2A}, x_{2C}$ имеют значения

$x_{2C}^* = 544{,}4825$ м,

$x_{2B}^* = 447{,}5032$ м,

$x_{2C} = 426{,}1677$ м,

$x_{2A} = 461{,}1655$ м.

Из выражений (Б.67), (Б.68) следует

η_{2C}^{*}=96,9793 м,

η_{2}^{*}=131,9771 м.

Горизонтальная и вертикальная проекции свободного провиса нижнего участка цепи, а также горизонтальная проекция провиса всей цепи вычисляются по формулам (Б.69)-(Б.71)

$$\eta_{2C} = 96{,}9793 + \frac{539{,}37 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 97{,}9613 \text{ м},$$

$$\zeta_{2C} = 495{,}4955\left(\operatorname{ch}\frac{544{,}4825}{495{,}4955} - \operatorname{ch}\frac{447{,}5032}{495{,}4955}\right) = 114{,}3137 \text{ м},$$

$$\eta_{2} = 131{,}9771 + \frac{539{,}37 \cdot 150{,}00}{8846196 \cdot 0{,}0093} + \frac{539{,}37 \cdot 50{,}0}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 133{,}2865 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке и в узле крепления плавучести определяются по формулам (Б.72)-(Б.75)

$$T_{2A} = 539{,}37\operatorname{ch}\frac{461{,}1656}{495{,}4955} = 790{,}32 \text{ кН (80,59 тс)},$$

$$V_{2A} = 539{,}37\operatorname{sh}\frac{461{,}1655}{495{,}4955} = 577{,}71 \text{ кН (58,91 тс)},$$

$$T_{2C} = 539{,}37\operatorname{ch}\frac{544{,}4825}{495{,}4955} = 899{,}17 \text{ кН (91,69 тс)},$$

$$V_{2C} = 539{,}37 \operatorname{sh} \frac{544{,}4825}{495{,}4955} = 719{,}42 \text{ кН } (73{,}36 \text{ тс}).$$

Нагрузки на якорь вычисляются по формулам (Б.76)-(Б.77)

$$T_{2B} = 539{,}37 \operatorname{ch} \frac{447{,}5032}{495{,}4955} = 774{,}71 \text{ кН } (79{,}00 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 539{,}37 \operatorname{sh} \frac{447{,}5032}{495{,}4955} = 556{,}14 \text{ кН } (56{,}71 \text{ тс}).$$

После приложения внешней нагрузки R сооружение переместится в горизонтальном направлении. По формуле (Б.79) получено

$$u = 133{,}2865 - 125{,}2382 = 8{,}0483 \text{ м}.$$

Как следует из результатов расчета в настоящем примере, при применении якорных цепей с плавучестями имеет место разгружающий эффект, в резульате действия которого уменьшаются усилия в якорных связях, нагрузки на плавучий объект и перемещения объекта.

Пример 5

Требуется произвести расчет якорной системы плавучего сооружения с длинными цепями без подвесных грузов или плавучестей при наклонном дне акватории (случаи прямого и обратного уклонов) в предположении односторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор) $H_1 = 98{,}07$ кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну цепь $R = 441{,}30$ кН (45,00 тс);

длина якорной цепи от клюза до якоря $S = 187{,}50$ м;

возвышение клюзовой точки над поверхностью дна в первоначальном состоянии $\zeta = 30{,}00$ м;

уклон дна $i = \pm 0{,}1$;

калибр цепи 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059, 40 кН (210,00 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде $q = 1{,}0886$ кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = 0{,}0093$ м^2; модуль упругости цепи $E = 8846196$ кПа (902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с рекомендациями Б.14-Б.16.

Прямой уклон дна

В первоначальном состоянии (внешняя нагрузка отсутствует) параметр a_1 вычисляется из выражения (Б.80)

$$a_1 = \frac{98{,}07}{1{,}0886} = 90{,}0901 \text{ м}$$

Величины x_{1A}, x_{1B} определяются по формулам (Б.81), (Б.82)

$$x_{1B} = 90{,}0901 \operatorname{Arsh} 0{,}10 = 9{,}0090 \text{ м},$$

$$x_{1A} = 79{,}6000 \text{ м}.$$

Для величины η_1^* из формулы (Б.85) следует

$$\eta_1^* = 79{,}600 - 9{,}009 = 70{,}591 \text{ м}.$$

Для горизонтальной проекции η_1 и длины l_1 свободного провиса цепи расчеты по формулам (Б.86), (Б.87) дают значения

$$\eta_1 = 70{,}5910 + \frac{90{,}0901 \cdot 98{,}07}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{79{,}6000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) = 70{,}6878 \text{ м},$$

$$l_1 = 90{,}0901\left(\mathrm{sh}\frac{79{,}6000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) = 81{,}3599 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке, а также вертикальная составляющая усилия на якорь по формулам (Б.80)-(Б.90) имеют значения

$$T_{1A} = 98{,}07\mathrm{ch}\frac{79{,}6000}{90{,}0901} = 138{,}86 \text{ кН (14,16 тс)},$$

$$V_{1A} = 98{,}07\mathrm{sh}\frac{79{,}6000}{90{,}0901} = 98{,}36 \text{ кН (10,03 тс)},$$

$$V_{1B} = 98{,}07 \cdot 0{,}10 = 9{,}807 \text{ кН (1,00 тс)}.$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь $H_1 = 98{,}07$ кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь рассчитывается по формуле (Б.91)

$$H_2 = 98{,}07 + 441{,}30 = 539{,}37 \text{ кН (55,00 тс)}.$$

Величина x_{2A} определяется по формуле (Б.92), а все остальные геометрические и силовые характеристики цепи находятся по формулам (Б.81), (Б.82), (Б.85)-(Б.90), в которых индекс 1 заменяется индексом 2

$$a_2 = \frac{539,37}{1,0886} = 495,4955 \text{ м},$$

$$x_{2B} = 495,4955 \text{Arsh} 0,10 = 49,5495 \text{ м},$$

$$x_{2A} = 219,4000 \text{ м},$$

$$\eta_2^* = 218,4100 - 49,5495 = 168,8605 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 168,8605 + \frac{495,4955 \cdot 539,37}{0,0093 \cdot 8846196}\left(\text{sh}\frac{218,4100}{495,4955} - 0,10\right) = 170,0128 \text{ м},$$

$$l_2 = 495,4955\left(\text{sh}\frac{218,4100}{495,4955} - 0,10\right) = 176,0010 \text{ м},$$

$$T_{2A} = 539,37\text{ch}\frac{218,4100}{495,4955} = 592,62 \text{ кН } (60,43 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539,37\text{sh}\frac{218,4100}{495,4955} = 245,56 \text{ кН } (25,56 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 539,37 \cdot 0,10 = 53,937 \text{ кН } (5,50 \text{ тс}).$$

Перемещение сооружения u определяется по формуле (Б.93)

$$u = (168,8605 - 70,5910) - \frac{176,0010 - 81,3599}{\sqrt{1 + 0,10^2}} +$$

$$+ \frac{187,50 \cdot 441,30}{8846196 \cdot 0,0093} = 5,1037 \text{ м}.$$

Обратный уклон дна

В первоначальном состоянии параметр цепной линии определяется по формуле (Б.80)

$a_1 = 90{,}0901$ м.

Величины x_{1B}, x_{1A} определяются из уравнения (Б.81) методом подбора с учетом выражения (Б.82)

$x_{1B} = -9{,}0090$ м,

$x_{1A} = 63{,}3700$ м.

Величина η_1^* по формуле (Б.85)

$\eta_1^* = 72{,}3790$ м.

Для горизонтальной проекции и длины свободного провиса цепи расчеты по формулам (Б.86), (Б.87) дают

$$\eta_1 = 72{,}3790 + \frac{90{,}0901 \cdot 98{,}07}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{63{,}3700}{90{,}0901} + 0{,}10\right) = 72{,}4715 \text{ м},$$

$$l_1 = 90{,}0901\left(\mathrm{sh}\frac{63{,}3700}{90{,}0901} + 0{,}10\right) = 77{,}7354 \text{ м}.$$

По формулам (Б.88)-(Б.90) рассчитываются усилия в клюзовой точке цепи и нагрузки на якорь

$$T_{1A} = 98{,}07 \operatorname{ch} \frac{63{,}3700}{90{,}0901} = 123{,}37 \text{ кН } (12{,}58 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07 \operatorname{sh} \frac{63{,}3700}{90{,}0901} = 74{,}82 \text{ кН } (7{,}63 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 98{,}07 \cdot (-0{,}10) = -9{,}807 \text{ кН } (-1{,}00 \text{ тс}).$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь $H_1 = 98{,}07$ кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь определяется в соответствии с формулой (Б.91)

$H_2 = 539{,}37$ кН (55,00 тс).

Величина x_{2A} рассчитывается по формуле (Б.92), а все остальные геометрические и силовые характеристики цепи вычисляются по формулам (Б.81), (Б.82), (Б.85)-(Б.90), в которых индекс 1 заменяется индексом 2. Из выражения (Б.80) находится параметр цепной линии

$a_2 = 495{,}4955$ м.

Величины x_{2A}, x_{2B} согласно формулам (Б.92), (Б.82) имеют значения

$x_{2B} = -49{,}5495$ м,

$x_{2A} = 123{,}93$ м.

Для величины η_2^* по формуле (Б.85) получено

$\eta_2^{*} = 173{,}4795$ м.

Горизонтальная проекция и длина свободного провиса цепи определяются по формулам (Б.86), (Б.87)

$$\eta_1 = 173{,}4795 + \frac{495{,}4955 \cdot 539{,}37}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{123{,}9300}{495{,}4955} + 0{,}10\right) = 174{,}6237 \text{ м},$$

$$l_1 = 495{,}4955\left(\mathrm{sh}\frac{123{,}9300}{495{,}4955} + 0{,}10\right) = 174{,}7662 \text{ м}.$$

Усилия в клюзовой точке цепи и вертикальная составляющая усилия на якорь следуют из формул (Б.88)-(Б.90)

$$T_{2A} = 539{,}37\mathrm{ch}\frac{123{,}9300}{495{,}4955} = 556{,}33 \text{ кН } (56{,}73 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\mathrm{sh}\frac{123{,}9300}{495{,}4955} = 136{,}31 \text{ кН } (13{,}90 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 539{,}37 \cdot (-0{,}10) = -53{,}937 \text{ кН } (-5{,}50 \text{ тс}).$$

Перемещение сооружения u определяется по формуле (Б.93)

$$u = (173{,}4795 - 72{,}3790) - \frac{174{,}7662 - 77{,}7354}{\sqrt{1 + (-0{,}10)^2}} + \\ + \frac{187{,}50 \cdot 441{,}30}{8846196 \cdot 0{,}0093} = 5{,}5569 \text{ м}.$$

Пример 6

Требуется произвести расчет якорной системы плавучего сооружения с длинными цепями и подвесными грузами или плавучестями при наклонном дне (случай прямого уклона) в предположении односторонней работы при исходных данных:

горизонтальная составляющая натяжения цепи в первоначальном состоянии (распор) H_1 = 98,07 кН (10,00 тс);

внешняя горизонтальная нагрузка на одну цепь R = 441,30 кН (45,00 тс);

сила тяжести (вес) в воде подвешенного к цепи груза или выталкивающая сила плавучести G = 196,13 кН (20,00 тс);

длина верхнего участка цепи от клюза до груза или плавучести S_0 = 12,50 м;

длина нижнего участка цепи от груза или плавучести до якоря S' = 250,00 м;

возвышение клюзовой точки над поверхностью дна в первоначальном состоянии ζ = 50,00 м;

уклон дна i = ±0,1;

калибр цепи 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059, 40 кН (210,00 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде q=1,0886 кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи F = F' =0,0093 м^2; модуль упругости цепи E = E' =8846196 кПа (902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с рекомендациями Б.17-Б.19.

Якорная цепь с подвесным грузом

В первоначальном состоянии (внешняя нагрузка R отсутствует) параметр цепной линии a_1 по формуле (Б.94) равен

$$a_1 = \frac{98,07}{1,0886} = 90,0901 \text{ м}.$$

Так как $q = q^*$, то $a_1 = a_1^*$.

Величины $x_{1C}^*, x_{1A}, x_{1C}, x_{1B}$ определяются из уравнения (Б.96) подбором с использованием выражений (Б.97)-(Б.99)

$$x_{1C}^* = 88,9000 \text{ м},$$

$$x_{1A} = 141,2611 \text{ м},$$

$$x_{1C} = 136,1260 \text{ м},$$

$$x_{1B}^* = 9,0090 \text{ м}.$$

Для величин $\eta_{1C}^* \eta_1^*$ расчеты ведутся по формулам (Б.102), (Б.103)

$$\eta_{1C}^* = 88,9000 - 9,009 = 79,8910 \text{ м},$$

$$\eta_1^* = 141,2611 - 136,1260 + 88,9000 - 9,090 = 85,0261 \text{ м}.$$

Горизонтальная η_{1C} и вертикальная ζ_{1C} проекции свободного провиса нижнего участка цепи следуют из формул (Б.104), (Б.105)

$$\eta_{1C} = 79,8910 + \frac{98,07 \cdot 90,0901}{0,0093 \cdot 8846196}\left(\text{sh}\frac{88,9000}{90,0901} - 0,10\right) = 80,0041 \text{ м},$$

$$\zeta_{1C} = 90{,}0901\left(\operatorname{ch}\frac{88{,}9000}{90{,}0901} - \sqrt{1 + 0{,}10^2}\right) - 0{,}10 \times$$

$$\times\left(79{,}8910 + \frac{98{,}07 \cdot 250{,}0}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 39{,}4785 \text{ м}.$$

Горизонтальная проекция η_1 и длина l_1 провиса всей цепи по формулам (Б.106), (Б.107)

$$\eta_1 = 85{,}0261 + \frac{98{,}07 \cdot 90{,}0901}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\operatorname{sh}\frac{88{,}9000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) +$$

$$+ \frac{98{,}07 \cdot 12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 85{,}1541 \text{ м},$$

$$l_1 = 12{,}50 + 90{,}0901\left(\operatorname{sh}\frac{88{,}9000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) = 107{,}5376 \text{ м}.$$

Усилия в клюзовой точке цепи и нагрузки на якорь по формулам (Б.108), (Б.109), (Б.112) имеют значения

$$T_{1A} = 98{,}07\operatorname{ch}\frac{141{,}2611}{90{,}0901} = 245{,}46 \text{ кН } (25{,}03 \text{ тс}),$$

$$V_{1A} = 98{,}07\operatorname{sh}\frac{141{,}2611}{90{,}0901} = 224{,}96 \text{ кН } (22{,}94 \text{ тс}),$$

$$V_{1B} = 98{,}07 \cdot 0{,}10 = 9{,}807 \text{ кН } (1{,}00 \text{ тс}).$$

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь по формуле (Б.113)

H_2=98,07+441,30=539,37 (55,00 тс).

Величина x^{*}_{2C} определяется методом подбора или графически из уравнения (Б.114), а все остальные геометрические и силовые характеристики цепи вычисляются по формулам (Б.94), (Б.95), (Б.97)-(Б.99), (Б.102)-(Б.112), в которых индекс 1 заменен на индекс 2

$$a_2 = \frac{539{,}37}{1{,}0886} = 495{,}4955 \text{ м},$$

$x^{*}_{2C} = 252{,}1000$ м,

$x_{2A} = 338{,}7207$ м,

$x_{2C} = 328{,}6126$ м,

$x_{2B} = 49{,}5495$ м,

$\eta^{*}_{2C} = 252{,}1000 - 49{,}5495 = 202{,}5505$ м,

$\eta^{*}_{2} = 338{,}7207 - 338{,}6126 + 252{,}1000 - 49{,}5495 = 212{,}6586$ м,

$$\eta_{2C} = 202{,}5505 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{8846196 \cdot 0{,}0093}\left(\operatorname{sh}\frac{252{,}1000}{495{,}4955} - 0{,}10\right) = 203{,}9488 \text{ м},$$

$$\zeta_{2C} = 495{,}4955\left(\operatorname{ch}\frac{252{,}1000}{495{,}4955} - \sqrt{1 + 0{,}10^2}\right) - 0{,}10 \times$$
$$\times\left(202{,}5505 + \frac{539{,}37 \cdot 250{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 44{,}8544 \text{ м},$$

$$\eta_2 = 212{,}6586 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}495}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{252{,}1000}{495{,}4955} - 0{,}10\right) +$$

$$+ \frac{539{,}37 \cdot 12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 214{,}1387 \text{ м},$$

$$l_2 = 12{,}50 + 495{,}4955\left(\mathrm{sh}\frac{252{,}1000}{495{,}4955} - 0{,}10\right) = 226{,}0784 \text{ м},$$

$$T_{2A} = 539{,}37\mathrm{ch}\frac{338{,}7207}{495{,}4955} = 670{,}38 \text{ кН } (68{,}36 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\mathrm{sh}\frac{338{,}7207}{495{,}4955} = 398{,}05 \text{ кН } (40{,}59 \text{ тс}),$$

$V_{2B} = 539{,}37 \cdot 0{,}10 = 53{,}937$ кН (5,50).

Горизонтальное перемещение сооружения u по формуле (Б.115)

$$u = (212{,}6586 - 85{,}0261) - \frac{226{,}0784 - 107{,}5376}{\sqrt{1 + 0{,}10^2}} +$$

$$+ 441{,}30\left(\frac{250{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} + \frac{12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 11{,}0875 \text{ м}.$$

Якорная цепь с плавучестью

Здесь исходные данные те же, что и случае цепи с грузом. Символом G обозначена выталкивающая сила закрепленной на цепи плавучести. Принято G=196,13 кН (20,00 тс).

Так как в первоначальном состоянии $q = q^*$, то $a_1 = a_1^*$ параметр цепной линии по формуле (Б.94) a_1=90,0901 м.

Величины x_{1C}^*, x_{1B}^*, x_{1A}, x_{1C} определяются из уравнения (Б.96) подбором с использованием соотношений (Б.97)-(Б.99)

x^{*}_{1C}=96,200 м,

x^{*}_{1B}=9,0090 м,

x_{1A}=36,9189 м,

x_{1C}=25,1351 м.

Для величин $\eta^{*}_{1C}, \eta^{*}_{1}$ из выражений (Б.102), (Б.103)

η^{*}_{1C}=87,1910 м,

η^{*}_{1}=98,9748 м.

Горизонтальная и вертикальная проекции свободного провиса нижнего участка цепи вычисляются по формулам (Б.104), (Б.105)

$$\eta_{1C} = 87{,}1910 + \frac{98{,}07 \cdot 90{,}0901}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{96{,}2000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) =$$
$$= 87{,}3178 \text{ м} ,$$

$$\zeta_{1C} = 90{,}0901\left(\mathrm{ch}\frac{96{,}2000}{90{,}0901} - \sqrt{1 + 0{,}10^{2}}\right) - 0{,}10 \times$$
$$\times\left(87{,}1910 + \frac{98{,}07 \cdot 250{,}0}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 46{,}9560 \text{ м} .$$

Горизонтальная проекция η_1 и длина l_1 свободного провиса всей цепи рассчитываются по формулам (Б.106), (Б.107)

$$\eta_1 = 98{,}9748 + \frac{90{,}0901 \cdot 98{,}07}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{896{,}2000}{90{,}0901} - 0{,}10\right)$$
$$+ \frac{98{,}07 \cdot 12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 99{,}1135 \text{ м},$$

$$l_1 = 12{,}50 + 90{,}0901\left(\mathrm{sh}\frac{96{,}2000}{90{,}0901} - 0{,}10\right) = 119{,}0404 \text{ м}.$$

Усилия в цепи в клюзовой точке цепи рассчитываются по формулам (Б.108), (Б.109)

$$T_{1A} = 98{,}07\mathrm{ch}\frac{36{,}9189}{90{,}0901} = 106{,}40 \text{ кН (10,85 тс)},$$

$$V_{1A} = 98{,}07\mathrm{sh}\frac{36{,}9189}{90{,}0901} = 41{,}29 \text{ кН (4,21 тс)}.$$

Усилия в цепи в точке крепления плавучести и нагрузки на якорь следуют из формул (Б.110)-(Б.112)

$$T_{1C} = 98{,}07\mathrm{ch}\frac{96{,}2000}{90{,}0901} = 159{,}46 \text{ кН (10,85 тс)},$$

$$V_{1C} = 98{,}07\mathrm{sh}\frac{96{,}2000}{90{,}0901} = 125{,}82 \text{ кН (12,83 тс)},$$

$$V_{1B} = 98{,}07 \cdot 0{,}10 = 9{,}807 \text{ кН (1,00 тс)}.$$

Горизонтальная составляющая усилия на якорь $H_1 = 98{,}07$ кН (10,00 тс).

В рабочем состоянии горизонтальная нагрузка на якорь по формуле (Б.113)

$H_2 = 98{,}07 + 441{,}30 = 539{,}37$ кН (55,00 тс).

Величина x^*_{2C} определяется подбором графически или из уравнения (Б.114), а все остальные геометрические и силовые характеристики цепи вычисляются по формулам (Б.94), (Б.95), (Б.97)—(Б.99), (Б.102)-(Б.112), в которых индекс 1 заменяется индексом 2.

Расчет параметров цепных линий по формулам (Б.94), (Б.95)

$a_2 = a^*_2 = 495{,}4955$ м.

Величины $x^*_{2C}, x_{2A}, x_{2C}, x^*_{2B}$ определяются из выражений (Б.114), (Б.97)-(Б.99) и имеют значения

$x^*_{2C} = 260{,}0600$ м,

$x_{2B} = 49{,}5495$ м,

$x_{2A} = 189{,}8739$ м,

$x_{2C} = 178{,}2297$ м.

Для величин η^*_{2C}, η^*_2 из формул (Б.102), (Б.103) следует

$\eta^*_{2C} = 210{,}5105$ м,

$\eta^*_2 = 222{,}1547$ м.

Горизонтальная и вертикальная проекции свободного провиса нижнего участка цепи вычисляются по формулам (Б.104), (Б.105)

$$\eta_{2C} = 210{,}515 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{260{,}0600}{495{,}4955} - 0{,}10\right) =$$
$$= 211{,}9677 \text{ м},$$

$$\zeta_{2C} = 495{,}4955\left(\mathrm{ch}\frac{260{,}0600}{495{,}4955} - \sqrt{1 + 0{,}10^2}\right) - 0{,}10 \times$$
$$\times\left(210{,}5105 + \frac{539{,}37 \cdot 250{,}0}{0{,}0093 \cdot 8846196}\right) = 44{,}650 \text{ м} .$$

Горизонтальная проекция и длина провиса всей цепи по формулам (Б.106), (Б.107)

$$\eta_2 = 222{,}1547 + \frac{539{,}37 \cdot 495{,}4955}{0{,}0093 \cdot 8846196}\left(\mathrm{sh}\frac{260{,}0600}{495{,}4955} - 0{,}10\right)$$
$$+ \frac{539{,}37 \cdot 12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196} = 223{,}6937 \text{ м},$$

$$l_2 = 12{,}50 + 495{,}4955\left(\mathrm{sh}\frac{260{,}0600}{495{,}4955} - 0{,}10\right) = 235{,}0766 \text{ м}.$$

Усилия в клюзовой точке цепи по формулам (Б.108), (Б.109) имеют значения

$$T_{2A} = 539{,}37\mathrm{ch}\frac{189{,}8739}{495{,}4955} = 579{,}47 \text{ кН } (59{,}09 \text{ тс}),$$

$$V_{2A} = 539{,}37\mathrm{sh}\frac{189{,}8739}{495{,}4955} = 211{,}73 \text{ кН } (21{,}59 \text{ тс}).$$

Усилия в цепи в точке крепления плавучести и нагрузки на якорь по формулам (Б.110)-(Б.112)

$$T_{2C} = 539{,}37 \operatorname{ch} \frac{260{,}0600}{495{,}4955} = 615{,}37 \text{ кН } (62{,}75 \text{ тс}),$$

$$V_{2C} = 539{,}37 \operatorname{ch} \frac{260{,}00}{495{,}4955} = 296{,}26 \text{ кН } (30{,}21 \text{ тс}),$$

$$V_{2B} = 539{,}37 \cdot 0{,}10 = 53{,}937 \text{ кН } (5{,}50 \text{ тс}).$$

Горизонтальное перемещение сооружения u после приложения внешней нагрузки вычисляется по формуле (Б.115)

$$u = (222{,}1547 - 98{,}9748) - \frac{235{,}0766 - 119{,}0404}{\sqrt{1 + 0{,}10^2}} +$$
$$+ 441{,}30 \left(\frac{250{,}00}{0{,}0093 \cdot 8846196} + \frac{12{,}50}{0{,}0093 \cdot 8846196} \right) = 9{,}1271 \text{ м} .$$

Анализ результатов расчета в настоящем примере показывает, что при применении якорных цепей с плавучестями имеет место значительный разгружающий эффект, при этом существенно уменьшаются усилия в якорных связях, нагрузки на плавучий объект и перемещения объекта.

Е.2 Динамический расчет якорных связей как элементов якорных систем

Пример 7

Требуется определить полное наибольшее натяжение короткой цепи в клюзовой точке при колебаниях плавучего сооружения для исходных

данных примера 3. В результате статического расчета для рабочего состояния получены значения

параметр цепной линии $a_2 = 1176{,}47$ м;

горизонтальная проекция свободного провиса цепи $\eta_2 = 193{,}05$;

вертикальная проекция свободного провиса цепи $\zeta = 100{,}00$ м;

координатные параметры $x_{2A} = 687{,}78$ м, $x_{2B} = 497{,}67$ м;

полное натяжение цепи в цепной опоре $T_{2A} = 461{,}21$ кН (47,03 тс);

полное натяжение цепи в точке крепления к якорю $T_{2A} = 427{,}86$ кН (43,63 тс);

среднее натяжение цепи

$$T_{2m} = 0{,}5(461{,}21 + 427{,}86) = 444{,}53 \text{ кН (45,33 тс)};$$

калибр цепи 43 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 719,81 кН (73,40 тс); разрывная нагрузка 1008,12 кН (102,80 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде q=0,3334 кН/м (0,034 тс/м); площадь сечения общего звена цепи F=0,0029 м^2 модуль упругости цепи E=9913346 кПа (1010880 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с приложением Г.

Дополнительные данные:

амплитуды вынужденных колебаний плавучего сооружения $A_x = A_z = 1{,}00$ м;

период волн $T = 7{,}0$ с;

частота волн $\omega = \dfrac{2\pi}{7{,}0} = 0{,}898$ с$^{-1}$;

масса единицы длины якорной цепи с учетом присоединенной массы воды по формуле (В.26)

$$\mu = 1{,}30\frac{0{,}3334}{9{,}81} = 0{,}0442 \text{ т/м}.$$

Значения частот λ_1 свободных колебаний цепи определяются из выражений (Г.1), (Г.2). Для первых пяти форм колебаний получено

$$\lambda_1^2 = \frac{1 \cdot 3{,}14^2 \cdot 444{,}53}{0{,}0442 \cdot 193{,}05^2} + \frac{8 \cdot 1176{,}47 \cdot 3{,}14^2 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{0{,}0442\left(193{,}05^2 + 1176{,}47^2 \cdot 3{,}14^2\right)^2} \times$$

$$\times \operatorname{ch}^2 \frac{193{,}05}{2 \cdot 1176{,}47} \operatorname{ch} \frac{687{,}78 + 497{,}67}{2 \cdot 1176{,}47} + \frac{1 \cdot 3{,}14^2 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{4 \cdot 0{,}0442 \cdot 193{,}05^2} \times$$

$$\times \left(1176{,}47 \operatorname{sh} \frac{193{,}05}{1176{,}47} \operatorname{ch} \frac{687{,}78 + 497{,}67}{1176{,}47} - 193{,}05\right) = 27{,}21 \text{ с}^{-2},$$

$$\lambda_1 = 5{,}22 \text{ с}^{-1},$$

$$\lambda_2^2 = \frac{2^2 \cdot 3{,}14^2 \cdot 444{,}53}{0{,}0442 \cdot 193{,}05^2} + \frac{2 \cdot 2^2 \cdot 3{,}14^2 \cdot 100{,}00^2 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{0{,}0442\left(193{,}05^2 + 1176{,}47^2 \cdot 1 \cdot 3{,}14^2\right)^2} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 3{,}14^2 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{4 \cdot 0{,}0442 \cdot 193{,}05^2} \times$$

$$\times \left(1176{,}47 \operatorname{sh} \frac{193{,}05}{1176{,}47} \times \operatorname{ch} \frac{687{,}78 + 497{,}67}{1176{,}47} - 193{,}05\right) = 106{,}89 \text{ с}^{-2},$$

$$\lambda_2 = 10{,}34 \text{ с}^{-1},$$

$\lambda_3 = 15{,}51 \text{ с}^{-1}$,

$\lambda_4 = 20{,}68 \text{ с}^{-1}$,

$\lambda_5 = 25{,}85 \text{ с}^{-1}$.

Горизонтальные колебания

Величина τ определяется из выражения (Г.6)

$$\tau = \sqrt{\frac{0{,}0442 \cdot 0{,}898^2}{444{,}53 + 9913346 \cdot 0{,}0029}} = 0{,}0011 \text{ м}^{-1}.$$

Параметры δ_1 для первых пяти форм колебаний, определяемые по формуле (Г.7) имеют значения

$$\delta_1 = \frac{9913346 \cdot 0{,}0029}{0{,}0442 \cdot 193{,}05^3} \frac{2 \cdot 1 \cdot 1176{,}47 \cdot 3{,}14^2}{\left(193{,}05^2 + 1 \cdot 1176{,}47^2 \cdot 3{,}14^2\right)} \times$$
$$\times \left(\operatorname{ch} \frac{497{,}67}{1176{,}47} \cos 3{,}14 - \operatorname{ch} \frac{687{,}78}{1176{,}47} \right) = -0{,}0670 \text{ с}^{-2}\text{м}^{-1},$$

$\delta_2 = -0{,}00251 \text{ с}^{-2}\text{м}^{-1}$,

$\delta_3 = -0{,}0674 \text{ с}^{-2}\text{м}^{-1}$,

$\delta_4 = -0{,}00247 \text{ с}^{-2}\text{м}^{-1}$,

$\delta_5 = -0{,}0675 \text{ с}^{-2}\text{м}^{-1}$.

Величины ρ_1 вычисляются согласно формуле (Г.8)

$$\rho_1 = \frac{1 \cdot 1176{,}47^2 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(1 \cdot 3{,}14 + 0{,}0011 \cdot 193{,}05\right)}{193{,}05^3 + 1176{,}47^2 \cdot 193{,}05\left(1 \cdot 3{,}14 + 0{,}0011 \cdot 193{,}05\right)^2} -$$
$$- \frac{1 \cdot 1176{,}47^2 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(1 \cdot 3{,}14 + 0{,}0011 \cdot 193{,}05\right)}{193{,}05^3 + 1176{,}47^2 \cdot 193{,}05\left(1 \cdot 3{,}14 - 0{,}0011 \cdot 193{,}05\right)^2} =$$
$$= -0{,}0022 \text{ м}^{-1},$$

$\rho_2 = -0{,}00230 \text{ м}^{-1}$,

$\rho_3 = -0{,}00233 \text{ м}^{-1}$,

$\rho_4 = -0{,}00236 \text{ м}^{-1}$,

$\rho_5 = -0{,}00239 \text{ м}^{-1}$.

Полное наибольшее натяжение цепи в клюзовой точке с учетом динамической составляющей определяется по формуле (Г.5). После подстановки значений $\lambda_1, \delta_1, \tau, \rho_1$ и суммирования первых пяти членов ряда получено T_A = 610,37 кН (62,24 тс).

При расчете по приближенной формуле (Г.9) полное наибольшее натяжение цепи в клюзовой точке

$$T_A = 461{,}21 + \frac{1 \cdot 0{,}0011 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{\mathrm{tg}(0{,}0011 \cdot 193{,}05)} = 607{,}88 \text{ кН } (61{,}98 \text{ тс}).$$

Вертикальные колебания

Величины σ_1, рассчитанные в соответствие с формулой (Г.11), для первых пяти форм колебаний имеют значения

$$\sigma_1 = 100{,}00 \cdot (-0{,}0670) - 2 \cdot 0{,}898^2 = -8{,}3128 \text{ с}^{-2},$$

$$\sigma_2 = -1{,}8638 \text{ с}^{-2},$$

$$\sigma_3 = -8{,}3528 \text{ с}^{-2},$$

$$\sigma_4 = -1{,}8598 \text{ с}^{-2},$$

$$\sigma_5 = -8{,}3628 \text{ с}^{-2}.$$

При расчете по формуле (Г.10) натяжение цепи в клюзовой точке с учетом динамической составляющей равно T_A = 554,85 кН (56,58 тс). Расчет по приближенной формуле (Г.12) дает значение усилия в цепи

$$T_A = 461{,}21 + \frac{1 \cdot 9913346 \cdot 0{,}0029}{193{,}05} \operatorname{sh} \frac{687{,}78}{1176{,}47} = 553{,}36 \text{ кН } (56{,}42 \text{ тс}).$$

Из результатов расчета следует, что для цепей с малыми стрелами провисов, как это имеет место в настоящем примере, расчеты по формулам (Г.5), (Г.9) и (Г.10), (Г.12) дают весьма близкие результаты. Для других условий расхождение может быть значительно большим.

Пример 8

Требуется определить усилие в клюзовой точке длинной цепи с подвесным грузом при колебаниях плавучего сооружения для исходных данных примера 2. В результате статического расчета получено:

параметр цепной линии нижнего участка цепи в рабочем состоянии $a_2^* = 495{,}50$ м;

длина верхнего участка цепи (от клюза до груза), $S_0 = 50{,}00$ м;

длина нижнего участка цепи (от груза до якоря), $S^* = 425{,}00$ м;

длина свободного провиса цепи в рабочем состоянии $l_2 = 405{,}37$ м;

горизонтальная проекция провиса нижнего участка цепи $\eta_{2_n} = 330{,}3477$ м;

вертикальная проекция провиса нижнего участка цепи $\zeta_{2C} = 112{,}58$ м;

горизонтальная составляющая натяжения цепи в рабочем состоянии (распор) $H_2 = 539{,}37$ кН (55,00 тс);

полное натяжение цепи в клюзовой точке в рабочем состоянии $T_A = 832{,}58$ кН (84,90 тс);

вертикальная составляющая усилия в клюзовой точке в рабочем состоянии $V_{2A} = 634{,}29$ кН (64,68 тс);

калибр цепей 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059,40 кН (210,40 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде $q = q^* = 1{,}0886$ кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = F^* = 0{,}0093$ м^2; модуль упругости цепи $E = E^* = 8846196$ кПа (902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с рекомендациями Г.2.

Дополнительные данные:

амплитуды вынужденных колебаний плавучего сооружения $A_x = A_z = 1{,}00$ м;

период волн $T = 7{,}00$ с;

частота волн $\omega = \dfrac{2\pi}{7{,}00} = 0{,}898\ с^{-1}$;

масса подвешенного к цепи груза с учетом присоединенной массы воды, определяемая по формуле (В.27)

$$M_c = 2{,}3\frac{196{,}13}{9{,}81} = 45{,}98\ т.$$

Коэффициент жесткости C_0 верхнего участка цепи в точке подвеса груза по формуле (Г.13) имеет значение

$$C_0 = \frac{8846196 \cdot 0{,}093}{50{,}00} = 1645{,}39\ кН/м\ (167{,}78\ тс/м).$$

Коэффициенты жесткости C_1, C_2 нижнего участка цепи в точке подвеса груза следуют из формул (Г.7), (Г.8)

C_1 = 10,42 кН/м (1,06 тс/м),

C_2 = 4,63 кН/м (0,47 тс/м).

Величины $\sin\alpha_2$, $\cos\alpha_2$ определяются по формулам (Г.16), (Г.17)

$$\sin\alpha_2 = \frac{634,29}{832,58} = 0,7618,$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{539,37}{832,58} = 0,6478.$$

Коэффициенты жесткости K_{xz}, K_{zz} всей цепи в точке подвеса груза рассчитываются из выражений (Г.14), (Г.15)

K_{xz} = 822,41 кН/м (83,86 тс/м),

K_{zz} = 976,17 кН/м (99,54 тс/м).

Частота λ_{zc} свободных вертикальных колебаний груза по формуле (Г.18), имеет значение

$$\lambda_{zc} = \sqrt{\frac{976,17}{45,98}} = 4,61\ с^{-1}.$$

Расчет по формуле (Г.19) дает значение полного наибольшего натяжения T_A цепи в клюзовой точке с учетом динамической составляющей

$$T_A = 832{,}58 + \left(1{,}0 + \frac{822{,}41}{976{,}17} \times 1{,}0\right) 1645{,}39 \frac{0{,}898}{4{,}61} \times 0{,}7618 = 1282{,}45 \text{ кН} (130{,}77 \text{тс})$$

Пример 9

Требуется определить полное усилие в клюзовой точке короткой цепи с подвесным грузом при колебаниях плавучего сооружения для исходных данных примера 4. В результате статического расчета получено:

параметр цепной линии нижнего участка цепи в рабочем состоянии $a_2^* = 495{,}50$ м;

длина верхнего участка цепи (от клюза до груза), $S_0 = 50{,}00$ м;

длина нижнего участка цепи (от груза до якоря), $S^* = 150{,}00$ м;

горизонтальная проекция провиса нижнего участка цепи $\eta_{2c} = 105{,}30$ м;

вертикальная проекция провиса нижнего участка цепи $\zeta_{2c} = 107{,}58$ м;

горизонтальная составляющая натяжения цепи в рабочем состоянии (распор) $H_2 = 539{,}37$ кН (55,00 тс);

полное натяжение цепи в клюзовой точке в рабочем состоянии $T_A = 1041{,}17$ кН (106,17 тс);

вертикальная составляющая усилия в клюзовой точке в рабочем состоянии $V_{2A} = 890{,}54$ кН (90,81 тс);

калибр цепей 77 [ГОСТ 6348-71, цепи литые с распорками; пробная нагрузка 2059,40 кН (210,40 тс); разрывная нагрузка 2883,15 кН (294,00 тс); сила тяжести 1 м цепи в воде $q = q^* = 1{,}0886$ кН/м (0,111 тс/м); площадь поперечного сечения общего звена цепи $F = F^* = 0{,}0093$ м^2; модуль упругости цепи $E = E^* = 8846196$ кПа (902061 тс/м^2)].

Расчет производится в соответствии с Г.2.

Дополнительные данные:

амплитуды вынужденных колебаний плавучего сооружения $A_x = A_z = 1{,}0$ м ,

период волн $T = 7{,}0$ с,

частота волн $\omega = \frac{2\pi}{7{,}00} = 0{,}898\ с^{-1}$;

масса подвешенного к цепи груза с учетом присоединенной массы воды, определяемая по формуле (В.27) $M_c = 45{,}98$ т.

Коэффициент жесткости C_0 верхнего участка цепи в точке подвеса груза согласно формуле (Г.13) имеет значение $C_0 = 1645{,}39$ кН/м (167,72 тс/м).

Коэффициенты жесткости C_1, C_2 нижнего участка цепи в точке подвеса груза по формулам (В.11), (В.12)

$C_1 = 6{,}42$ кН/м (0,65 тс/м),

$C_2 = 4{,}41$ кН/м (0,45 тс/м).

Величины $\sin\alpha_2, \cos\alpha_2$ из выражений (Г.16), (Г.17)

$\sin\alpha_2 = 0{,}8554$,

$\cos\alpha_2 = 0{,}5180$.

Коэффициенты жесткости K_{xz}, K_{zz} всей цепи в точке подвеса груза вычисляются по формулам (Г.14), (Г.15)

$K_{xz} = 0,45 + 1645,39 \cdot 0,5180 \cdot 0,8554 = 735,49$ кН/м,

$$K_{zz} = 4,41 + 1645,39 \cdot 0,8554^2 + \frac{1041,17}{50,00} = 1229,18 \text{ кН/м}.$$

Частота λ_{zc} свободных вертикальных колебаний груза, определяемая по формуле (Г.18), имеет значение

$$\lambda_{zc} = \sqrt{\frac{12,29,18}{45,98}} = 5,17 \text{ с}^{-1}.$$

Расчет по формуле (Г.19) приводит к следующему значению полного наибольшего натяжения T_A цепи в клюзовой точке

$$T_A = 1041,17 + \left(1,0 + \frac{735,49}{1229,18} \times 1,0\right) 1645,39 \frac{0,898}{5,17} \times 0,8554 = 1431,92 \text{кН} (146,01 \text{тс}).$$

Е.3 Расчет распределения внешней нагрузки между якорными связями

Пример 10

Требуется определить распределение внешней нагрузки между якорными связями плавучего дока. Схема раскрепления дока показана на рисунке Е.1. Для удержания дока используются якорные цепи длиной $S = 150,0$ м каждая. Калибр цепи принят 111 мм ($q = 2,245$ кН/м, $1/EF = 1,15 \cdot 10^{-6}$ кН$^{-1}$).

Док устанавливается на акватории с глубиной воды 15 м. Вертикальная проекция провиса цепей составляет 12,4 м для случая дока по-

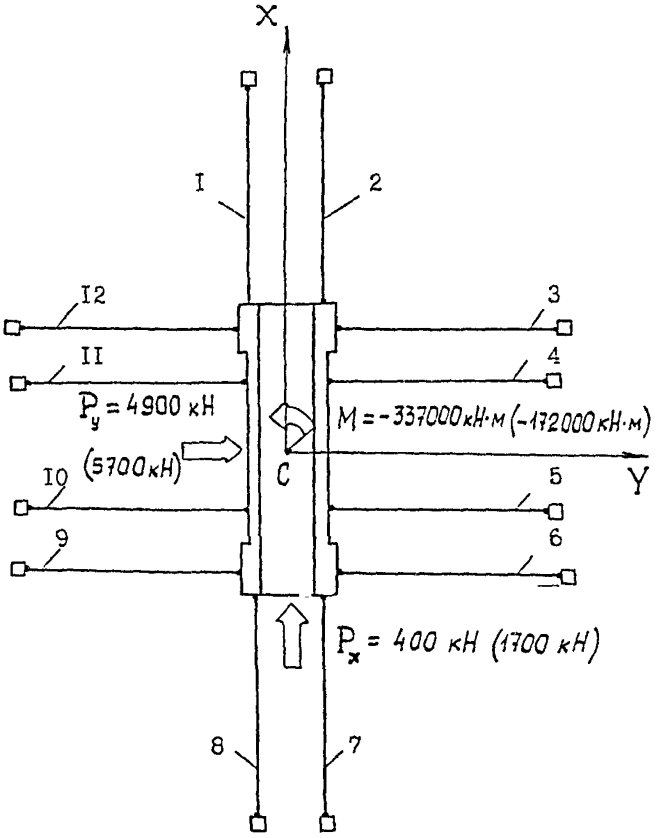


Рисунок Е.1 - Схема раскрепления плавучего дока

рожнем и 9,7 м для дока с расчетным кораблем. В первоначальном состоянии (внешние нагрузки не действуют, док порожнем) горизонтальная составляющая натяжения в цепях равна $H_i = 98{,}07$ кН, а горизонтальные проекции цепей составляют $\eta_i = 147{,}068$ м. Расчетные внешние нагрузки, действующие на плавучий док, приведены в таблице Е.1. Координаты a_j, b_j клюзовых опор и координаты x_{Bj}, y_{Bj} якорей приведены в таблице Е.2.

Таблица Е.1 - Расчетные нагрузки на док

	Продольная P_x, кН	Поперечная P_y, кН	Момент от внешних нагрузок М, кН·м
Док порожнем	400	4900	-337000
Док с кораблем	1700	5700	-172000

Расчет распределения нагрузок между цепями выполняется методом подбора. Сначала строятся жесткостные характеристики цепей $H(\eta)$ и якорной системы $P_x(x_c)$ и $P_y(y_c)$ при продольных x_c и поперечных y_c перемещениях дока.

Таблица Е.2 - Координаты клюзовых опор и якорей

Номер цепи	a_j, м	b_j, м	x_{Bj}, м	y_{Bj}, м
1	150	-35	297,068	-35
2	150	35	297,068	35
3	140	36	140	183,068
4	40	31	40	178,068
5	-40	31	-40	178,068
6	-140	36	-140	183,068
7	-150	35	-297,068	35
8	-150	-35	-297,068	-35
9	-140	-36	-140	-183,068
10	-40	-31	-40	-178,068
11	40	-31	40	-178,068
12	140	-36	140	-183,068

Поскольку параметры всех цепей одинаковы, то достаточно построить одну зависимость $H(\eta)$. При построении зависимости $H(\eta)$ по формуле (Б.116) определяются значения H_{1k} горизонтальной составляющей натяжения цепи, соответствующие переходу работы якорной связи от схемы длинных цепей к коротким

для случая док порожнем

$$H_{1k} = \frac{2{,}245\left(150^2 - 12{,}4^2\right)}{2 \cdot 12{,}4} = 2022{,}875 \text{ кН (206,20 тс)},$$

для случая док с кораблем

$$H_{1k} = \frac{2{,}245\left(150^2 - 9{,}7^2\right)}{2 \cdot 9{,}7} = 2592{,}849 \text{ кН (264,31 тс)}.$$

Задаваясь последовательно значениями натяжения H, вычисляются полные горизонтальные проекции η цепи. При $H < H_{1k}$ значения η находятся по формуле

$$\eta = \eta_1 + S\left(1 + \frac{H}{EF}\right) - l_1.$$

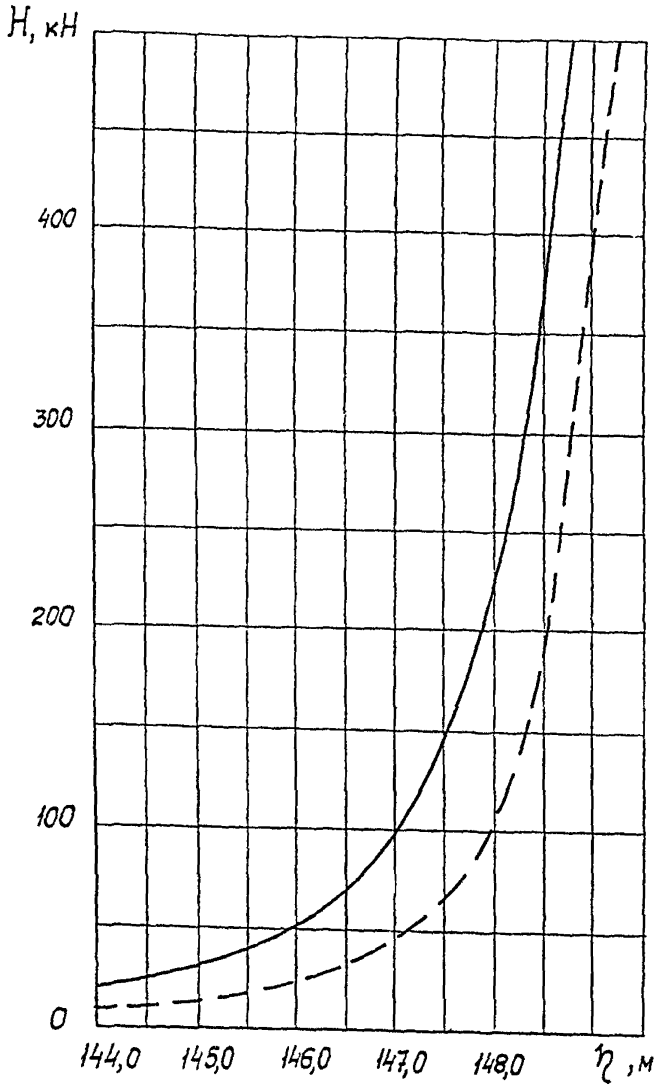
Значения η_1 и l_1 вычисляются по формулам (Б.3) и (Б.4). При $H < H_{1k}$ значение η определяется по выражению (Б.41). Зависимости $H(\eta)$ для случаев дока порожнем и с кораблем приведены в таблице Е.3 и на рисунках Е.2 и Е.3.

Таблица Е.3 - Жесткостные характеристики

H, кН	η, м		H, кН	η, м	
	док порожнем	док с кораблем		док порожнем	док с кораблем
10	142,683	144,690	300	148,343	148,882
20	144,175	145,845	400	148,607	149,077
30	145,011	146,471	500	148,800	149,221
40	145,567	146,880	1000	149,367	149,668
50	145,972	147,175	1500	149,715	149,962
60	146,284	147,685	2000	150,003	150,208
80	146,742	147,731	2500	150,237	150,431
100	147,068	147,965	3000	150,442	150,637
150	147,598	148,344	4000	150,821	151,021
200	147,929	148,582	5000	151,182	151,382

Жесткостные характеристики $P_x(x_c)$ и $P_y(y_c)$ якорной системы определяются в соответствии с выражениями (Д.1)-(Д.4). Используется следующая последовательность вычислений. Задаются перемещения дока (координаты x_c и y_c, считается $\varphi = 0$) и определяются по формуле (Д.2) координаты x_j и y_j клюзовых опор. Затем из формулы (Д.3) находятся углы ϑ_j и по формуле (Д.4) проекции η_j для каждой якорной связи. По полученным значениям η_j из графиков, приведенных на рисунках Е.2, Е.3 или из таблицы Е.3 определяются усилия H'_j. Из выражения (Д.1) вычисляются значения P_x и P_y внешних сил, соответствующих перемещениям x_c и y_c дока. Рассчитанные таким образом зависимости приведены на рисунках Е.4 и Е.5.

Зависимости $P_x(x_c)$ и $P_y(y_c)$ используются для определения значений $x_c^{(1)}$ и $y_c^{(1)}$ линейных перемещений дока в первом приближении для уточнения этих значений при действии на док расчетных нагрузок. Из графиков, приведенных на рисунках Е.4, Е.5, для дока порожнем ($P_x = 400$ кН, $P_y = 4900$ кН) линейные перемещения дока составляют



——— - для дока порожнем;
— — - для дока с кораблем

Рисунок Е.2 - Жесткостная характеристика цепи

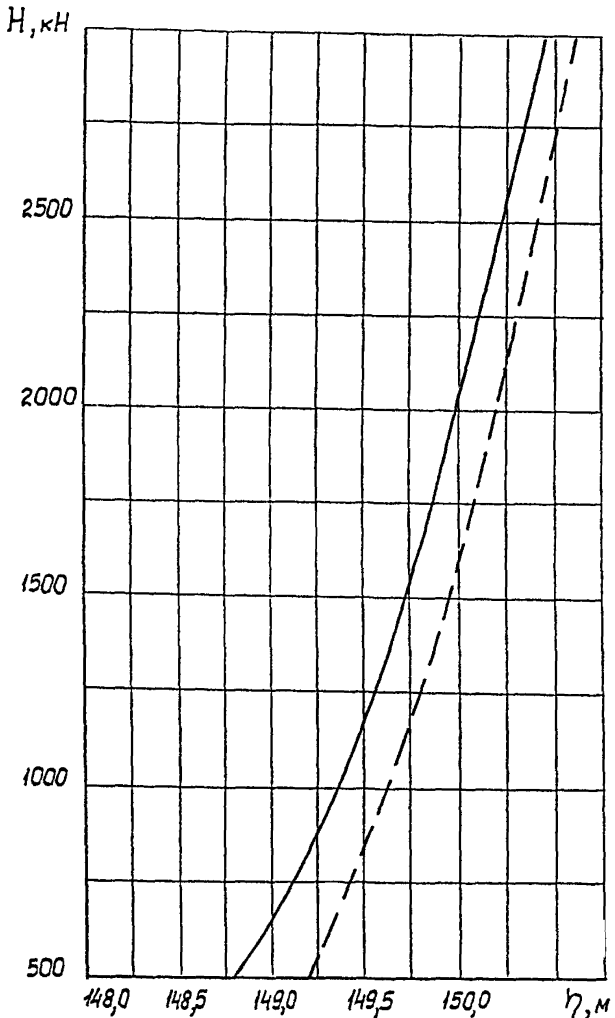


Рисунок Е.3 - Жесткостная характеристика цепи

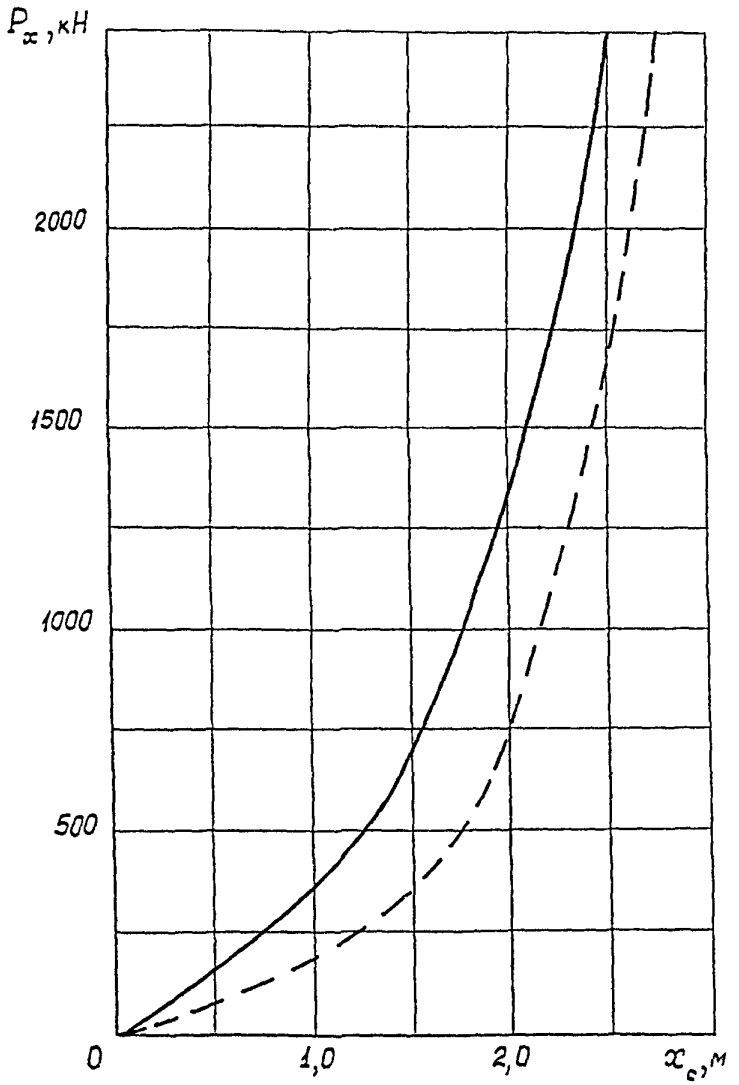
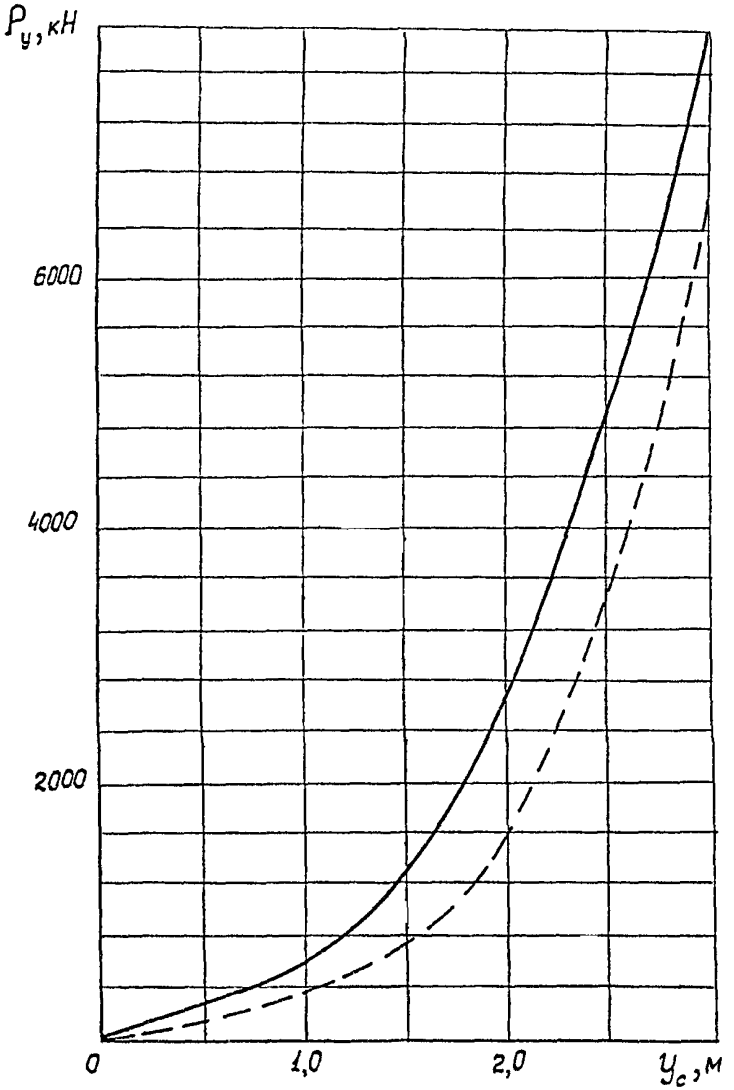


Рисунок Е.4 - Жесткостная характеристика якорной системы



——— - для дока порожнем;
— — - для дока с кораблем

Рисунок Е.5 - Жесткостная характеристика якорной системы плавучего дока при его поперечных перемещениях

$x_c^{(1)} = 1{,}08$ м и $y_c^{(1)} = 2{,}40$ м. Для определения нагрузок в цепях необходимо также задать значение угла поворота φ дока в плане, так как на док действует горизонтальный вращающий момент (для порожнего дока $M = -337000$ кН·м). Из схемы раскрепления согласно рисунку Е.1 и направления действия момента видно, что основную часть момента M воспринимают цепи №9 и №12. Поэтому приближенное значение $\varphi^{(1)}$ угла поворота дока можно определить по формуле

$$\varphi^{(1)} = \frac{57{,}3M}{C_{\eta\eta 9}a_9^2 + C_{\eta\eta 12}a_{12}^2} = \frac{-337000 \cdot 57{,}3}{1600 \cdot 140^2 + 1600 \cdot 140^2} = -0{,}3^0,$$

где $C_{\eta\eta 9}, C_{\eta\eta 12}$ - коэффициенты жесткости цепных опор якорных связей №9 и №12, которые определяются из графика, приведенного на рисунке Е.4 при среднем значении усилия в цепях рабочего борта

$$H_{ср} = \frac{P_y}{4} = 1225 \text{ кН},$$

a_9, a_{12} координаты клюзовых опор.

Далее в соответствии с формулами (Д.1)-(Д.4) и с учетом зависимости $H(\eta)$ вычисляются усилия в каждой якорной связи, соответствующие перемещениям дока $x_c = 1{,}08$ м и $y_c = 240$ м и $\varphi = 0{,}3^0$. Данные расчета приведены в таблице Е.4.

Невязки между расчетными внешними силами $P_x = 400$ кН, $P_y = 4900$ кН, $M = -337000$ кН·м и силами $P_x^{(1)} = 467$ кН, $P_y^{(1)} = 5012$ кН, $M^{(1)} = -305434$ кН·м, соответствующими возможным перемещениям дока. $x_c^{(1)} = 1{,}08$ м и $y_c^{(1)} = 2{,}40$ м и $\varphi^{(1)} = -0{,}3^0$, достаточно велики и поэтому требуется уточнить значения перемещений дока и распределения усилий в

связях. На основании полученных результатов и графиков, представленных на рисунках Е.4 и Е.5, принимаются уточненные значения перемещений дока $x_r^{(2)}=1,04$ м, $y_r^{(2)}=2,36$ м и $\varphi^{(2)}=-0,33^0$. Результаты расчета распределения усилий в связях при этих возможных перемещениях приведены в таблице Е.5. Из таблицы Е.5 видно, что невязки невелики (меньше 5%) и можно не производить дальнейших уточнений. Аналогичным образом выполняется расчет якорной системы для дока с кораблем. Окончательные результаты расчета по распределению усилий приведены в таблице Е.6.

Таблица Е.4 - Результаты расчета распределения усилий в связях $x_c = 1{,}08$ м и $y_c = 2{,}40$ м и $\varphi = -0{,}3^0$

(док порожнем)

Номер цепи	$x_j - x_c$, м	$y_j - y_c$, м	$x_j - x_{Bj}$, м	$y_j - y_{Bj}$, м	η_j, м	H_j, кН	H_{jx}, кН	H_{jy}, кН	H_{jM}, кН·м
1	149,815	-35,785	-146,170	1,595	146,182	56	-55,9	1,1	-3689
2	150,181	34,214	-145,807	1,594	145,816	46	-45,9	0,5	1649
3	140,186	35,367	1,266	-145,421	145,427	38	0,3	-37,9	-5338
4	40,162	30,790	1,242	-144,898	144,903	28	0,2	-27,9	1132
5	-39,837	31,209	1,243	-144,479	144,484	23	0,2	-22,9	910
6	-139,809	36,732	1,270	-143,956	143,961	18	0,2	-17,9	2510
7	-149,815	35,785	148,333	3,165	148,367	320	319,9	7,0	-12860
8	-150,181	-34,214	147,967	3,166	148,001	214	213,9	5,9	8678
9	-140,186	-35,266	0,894	150,181	150,184	2380	13,3	2379	-335937
10	-40,162	-30,790	0,918	149,658	149,661	1400	8,6	1399	-55960
11	39,837	-31,209	0,917	149,239	149,242	870	5,3	869,9	34824
12	139,809	-36,732	0,889	148,716	148,718	435	2,6	434,9	60911
							$P_x^{(1)} = 467$кН	$P_y^{(1)} = 5012$кН	$M^{(1)} = -305434$кН·м

Примечание. В таблице обозначено $H_{jx} - H_j \cos \vartheta_j$

$H_{jy} - H_j \sin \vartheta_j$

$H_{jM} - H_j\left[(x_j - x_c)\sin \vartheta_j - (y_j - y_c)\cos \vartheta_j\right]$.

Таблица Е.5 - Результаты расчета распределения усилий в связях $x_c = 1{,}04$ м и $y_c = 2{,}36$ м и $\varphi = -0{,}33^0$ (док порожнем)

Номер цепи	$x_j - x_c$, м	$y_j - y_c$, м	$x_j - x_{Bj}$, м	$y_j - y_{Bj}$, м	η_j, м	H_j, кН	H_{jx}, кН	H_{jy}, кН	H_{jM}, кН·м
1	149,796	-35,863	-146,232	1,495	145,837	58	-57,9	0,6	-2100
2	150,199	34,135	-145,829	1,495	145,837	46	-45,9	0,5	1640
3	140,205	35,193	1,245	-145,515	145,520	40	0,3	-39,9	-5600
4	40,178	30,769	1,218	-144,939	144,944	28	0,2	-27,9	-1133
5	-39,821	31,229	1,219	-144,478	144,483	23	0,2	-22,9	909
6	-139,790	36,809	1,249	-143,902	143,908	18	0,1	-17,9	2510
7	-149,796	35,863	148,312	3,223	148,347	296	295,9	6,4	-11580
8	-150,199	-34,135	147,909	3,225	147,944	202	201,9	4,4	6230
9	-140,205	-35,193	0,835	150,235	150,237	2500	13,9	2499	-350020
10	-40,178	-30,769	0,862	149,659	149,661	1420	8,2	1410	-56800
11	39,821	-31,229	0,861	149,198	149,210	830	4,8	829	33200
12	139,790	-36,806	0,830	148,622	148,624	405	2,3	404	56690
							$P_x^{(1)} = 423$кН	$P_y^{(1)} = 5953$кН	$M^{(1)} = -160539$кН · м

Примечание. В таблице обозначено $H_{jx} - H_j \cos\vartheta_j$

$H_{jy} - H_j \sin\vartheta_j$

$H_{jM} - H_j\left[(x_j - x_c)\sin\vartheta_j - (y_j - y_c)\cos\vartheta_j\right]$

Таблица Е.6 - Результаты расчета распределения усилий в связях $x_c = 2{,}42$ м и $y_c = 2{,}86$ м и $\varphi = -0{,}11^0$ (док с с кораблем)

Номер цепи	$x_j - x_c$, м	$y_j - y_c$, м	$x_j - x_{Bj}$, м	$y_j - y_{Bj}$, м	η_j, м	H_j, кН	H_{jx}, кН	H_{jy}, кН	H_{jM}, кН·м
1	149,933	-35,288	-144,716	2,572	144,738	10	-10	0,2	-326
2	150,067	34,712	-144,581	2,572	144,604	9	-9	0,2	336
3	140,069	35,731	2,489	-144,477	144,498	9	0,2	-9	-1266
4	40,060	30,923	2,479	-144,285	144,306	8	0,1	-8	-328
5	-39,940	31,077	2,480	-144,131	144,153	7	0,1	-7	276
6	-139,931	36,269	2,489	-143,939	143,961	7	0,1	-7	974
7	-149,933	35,289	149,556	3,148	149,589	900	899,8	18,9	-34592
8	-150,067	-34,712	149,421	3,148	149,454	740	739,8	15,6	23340
9	-140,069	-35,731	2,351	150,197	150,215	2020	31,6	2019,7	-281874
10	-40,060	-30,923	2,361	150,005	150,023	1600	25,2	1599,8	-63310
11	39,940	-31,077	2,360	149,851	149,870	1310	20,6	1309,8	52950
12	139,931	-36,269	2,351	149,659	149,678	1020	16,0	1019,8	143280
							$P_x^{(1)} = 1714$кН	$P_y^{(1)} = 5953$кН	$M^{(1)} = -160539$кН · м

Примечание. В таблице обозначено H_{jx} - $H_j \cos \vartheta_j$

H_{jy} - $H_j \sin \vartheta_j$

H_{jM} - $H_j\left[\left(x_j - x_c\right)\sin \vartheta_j - \left(y_j - y_c\right)\cos \vartheta_j\right]$

Подписано к печати 30.10.02 объем 12,9 п.л.
Формат 60 х 84/16 тираж 60
Заказ № 24/02
Отпечатано в типографии 26 ЦНИИ МО РФ
ква, Е-179
gost.e-ecolog.ru