

В

для вузов

О.И. Крахин
Б.А. Левитан
А.П. Кузнецов

**СТАЦИОНАРНЫЕ АНТЕННЫ.
РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
КОНСТРУКЦИЙ**

МАШИНОСТРОЕНИЕ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)

О.И. КРАХИН, Б.А. ЛЕВИТАН, А.П. КУЗНЕЦОВ

СТАЦИОНАРНЫЕ АНТЕННЫ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

*Под редакцией профессора
Доктора техн. наук О. И. Крахина*

Допущено Учебно-методическим объединением вузов РФ по образованию в области авиации, ракетостроения и космоса (УМО АРК), в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 160400 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» направления 160400 «Авиационная и ракетно-космическая техника»



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2014

УДК 621.396.676:629.7,001.2(075.8)

ББК 32.845

К 78

Рецензенты:

Д-р техн. наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана А.В. Вершинский;
д-р техн. наук, профессор Московского энергетического института (НИУ) Б.Л. Коган, д-р физ.-мат. наук, профессор Московского энергетического института (НИУ) В.А. Пермяков

Крахин О.И., Левитан Б.А., Кузнецов А.П.

К 78 Стационарные антенны. Расчет и проектирование конструкций: учебник — М.: Машиностроение, 2014. — 240 с.: ил.

ISBN 978-5-94275-743-4

Изложены основы конструктивных решений линейных антенн, их токо-несущих и силовых частей, апертурных, зеркальных, линзовых и рупорных антенн и ФАР. Даны типовые конструктивные решения опор, башен, мачт. Приведены оценки видов воздействий на стационарные антенны: ветровые, климатические, температурные, гололедные, гравитационные, сейсмические, эксплуатационные и др. Рассмотрены методы расчета элементов и узлов антенн на прочность и жесткость на этапах проектирования. Даны рекомендации по оценке и выбору рациональных конструкций и технических решений.

Для студентов, обучающихся по специализации «Проектирование конструкций и систем радиотехнических информационных комплексов» может быть полезен аспирантам и специалистам, занимающихся вопросами проектирования антенных конструкций, а также других радиотехнических систем.

УДК 621.396.676:629.7,001.2(075.8)

ББК 32.845

ISBN 978-5-94275-743-4

© Авторы, 2014

© ООО «Издательство Машиностроение», 2014

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Классификация конструкций антенн	8
1.1. Конструкции линейных антенн.....	11
Токонесущие части линейных антенн.....	11
Силовые части линейных антенн.....	16
Конструкции опор	23
Конструкции башен.....	24
Конструкции мачт	25
1.2. Методы расчета элементов (частей) опор линейных антенн....	29
Расчет токонесущих конструкций проволочных антенн	29
Неподвижное крепление с термокомпенсатором	33
Расчет рей	36
Расчет башен.....	37
Расчет мачт	38
Особый случай расчета опор.....	47
Глава 2. Конструкции апертурных антенн	50
2.1. Конструкции зеркальных (рефлекторных) антенн	51
Расчет точности изготовления рефлектора	60
Несущие конструкции антенн	60
Схемы и типы соединения элементов ферменных конструкций ..	65
2.2. Конструкции линзовых антенн	75
2.3. Конструкции рупорных антенн	78
2.4. Расчет конструкций крупногабаритных апертурных антенн	80
2.5. Конструкции опор апертурных антенн	84
2.6. Нагрузки и воздействия на апертурные антенны.....	87
Глава 3. Фазированные антенные решетки	91
3.1. Основные свойства ФАР	92
3.2. Схемы построения ФАР.....	94
Фазовращатели ФАР	97
Излучатели ФАР	99

3.3. Тепловые режимы ФАР	102
Охлаждение ФАР	102
Системы отвода тепла ФАР	105
Расчет тепловых режимов	108
Глава 4. Расчет нагрузок и эксплуатационно-метеорологических воздействий на стационарные антенны	111
4.1. Общие сведения о ветре	111
Статистические закономерности распределения воздушных пото- ков у поверхности земли	113
Вертикальные профили воздушных потоков	117
Порывистость ветра	119
4.2. Расчет ветровой нагрузки	121
Ветровой резонанс	125
Галопирование	129
4.3. Гололедная нагрузка	133
4.4. Температурные климатические воздействия	135
4.5. Сейсмическое воздействие	137
Строительство в сейсмических районах	137
Расчетные нагрузки	138
4.6. Воздействие ударной волны	144
Параметры ударной волны	144
Взаимодействие ударных волн с преградой	145
Воздействие взрывных волн в грунте	156
4.7. Совместное действие нагрузок на антенные сооружения	159
Коэффициенты сочетания нагрузок	159
Расчет усилий и деформаций при совместном действии нагрузок	161
Приложение 1. Элементы технической аэродинамики	166
Уравнение состояния газов	166
Уравнение неразрывности	169
Уравнение Бернулли	173
Приложения уравнения неразрывности и уравнения Бернулли	175
Распределение давления по поверхности тела	176
Пограничный слой	177
Законы подобия в аэромеханике	183
Оси координат. Аэродинамические коэффициенты	188
Установки для экспериментальных исследований	190
Измерение аэродинамических сил весовым способом	192
Приложение 2. Аэродинамические коэффициенты апертурных антенн ...	193
Параболические отражатели со сплошной поверхностью	193
Параболические отражатели с решетчатой поверхностью	208
Приложение 3. Аэродинамические коэффициенты элементов антенных конструкций	213

Приложение 4. Расчет мачты. Алгоритм расчета	219
Первый этап. Расчет оттяжек	221
Второй этап. Расчет ствола мачты	224
Расчет мачты на устойчивость	227
Уравнения устойчивости	229
Приложение 5. Расчет гибких нитей.	230
Гибкая нить под действием распределенной нагрузки	230
Гибкая нить под действием сосредоточенных сил	235
Расчет проводов и канатов	237

Введение

Бурное развитие средств связи и телекоммуникаций обуславливает необходимость создания, развития и совершенствования антенн различного функционального назначения. Широкое применение антенн в различных условиях эксплуатации требует от проектантов обеспечения их прочности, надежности и эффективности в различных условиях взаимодействия с возмущающими факторами и нагрузками, а также сохранения при этом работоспособности и долговечности. Все это приводит к достаточному разнообразию конструкций, узлов и механизмов антенн, а при их проектировании требует обоснованных методов расчета во всем многообразии доминирующих силовых, тепловых, динамических и других нагрузок, в том числе и при воздействии окружающей среды, например, ветровые нагрузки, температурные и климатические, гололедные и др.

Принципы классификации антенн различны (по диапазонам радиоволн, применению, принципу действия и др.), однако при конструировании наиболее удобной является их классификация по функциональным признакам (принцип действия, способ формирования диаграммы направленности) и условиям эксплуатации.

По условиям размещения и эксплуатации антенные устройства делятся на стационарные, мобильные и устанавливаемые на летательных аппаратах.

Конструкции стационарных антенн различаются повторяемостью однотипных видов элементов конструкций, большими апертурами (раскрывом). Кроме этого, при их монтаже и сборке требуется, как правило, большой объем строительных и монтажных работ. К таким

антеннам предъявляются высокие требования по надежности и долговечности.

Разнообразие функционального назначения и широкий диапазон условий эксплуатации обуславливают для каждого вида стационарных антенн свой диапазон требований при их проектировании и, соответственно, множество исходных требований для расчета деталей, элементов и конструкций.

В работе рассмотрены основы проектирования и расчета стационарных конструкций антенных устройств всех классов (линейных антенн, апертурных и антенных решеток). Приведены методики определения нагрузок и воздействий на стационарные конструкции антенных устройств.

Настоящее учебное издание базируется на многолетнем опыте работы и преподавания рассматриваемых вопросов и будет полезно для студентов, аспирантов и специалистов, занимающихся вопросами проектирования антенных конструкций, а также других радиотехнических систем.

Классификация конструкций антенн

Для классификации антенн используется много различных принципов: по диапазонам радиоволн, применению, принципу действия и т.д.

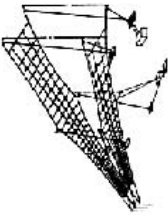
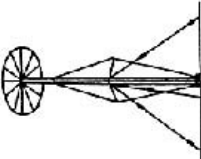
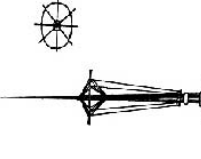
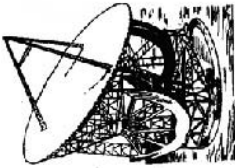
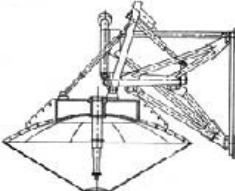
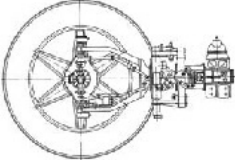
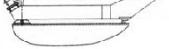
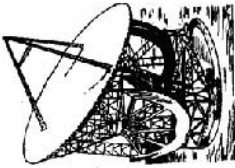
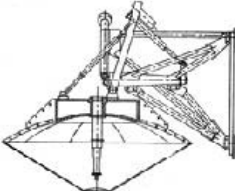
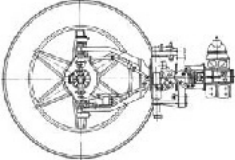
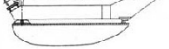
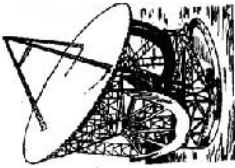
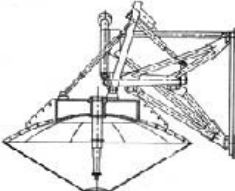
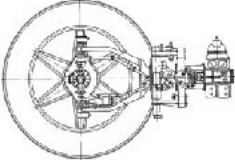
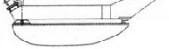
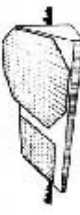
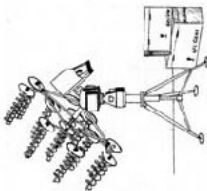
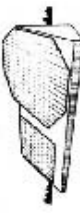
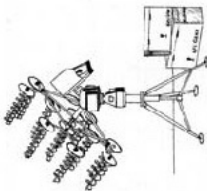
Однако при проектировании конструкций антенн наиболее удобно их классифицировать по функциональным признакам (принцип действия, способ формирования диаграммы направленности) и условиям эксплуатации. По функциональным признакам антенны делятся на три класса: линейные, апертурные и антенные решетки. Классификация антенных устройств приведена в табл. 1.1.

К линейным антеннам относятся излучающие системы, у которых размер поперечного сечения токонесущих элементов много меньше продольного и длины волны. Линейные антенны, как правило, являются всенаправленными или широконаправленными и используются в диапазоне длинных волн (ДВ), средних (СВ), коротких (КВ) и ультракоротких волн (УКВ). Наиболее характерным и распространенным видом линейных антенн являются проволочные.

Апертурными называют антенны, у которых излучение происходит с некоторой плоской поверхности. Апертурой называется поверхность, через которую проходит почти вся излучаемая мощность.

Апертурные антенны являются узконаправленными с шириной луча (диаграммы направленности) от нескольких секунд до нескольких градусов и применяются в сверхвысоком диапазоне частот (СВЧ), т.е. в диапазоне дециметровых, сантиметровых и мил-

1.1. Классификация антенных устройств

Вид антенны	Условия эксплуатации			
	Стационарные	Мобильные		Размещаемые на ЛА
		Наземные	Корабельные	
Линейные				
				
Апертурные				
				
ФАР				
				

лиметровых длин волн. В зависимости от способа формирования апертуры эти антенны делятся на рефлекторные (зеркальные), линзовые и рупорные.

Антенная решетка — это система, состоящая из некоторого числа (обычно однотипных) излучателей, определенным образом расположенных на поверхности. Выбор амплитуд и фаз тока обеспечивает реализацию необходимой направленности антенной решетки. Одним из видов антенной решетки является фазированная антенная решетка (ФАР).

Антенные решетки, как и апертурные, применяют в СВЧ-диапазоне, но в отличие от других классов антенн включают в себя радиоэлементы (диоды, триоды, сопротивления), ферритовые элементы, в которых лишь несколько процентов подводимой мощности преобразуется в полезный сигнал, а остальная часть выделяется в виде тепла. Поэтому в антенных решетках важной задачей при проектировании является обеспечение требуемого теплового режима.

Конструкции антенн должны удовлетворять требованиям прочности в экстремальных условиях эксплуатации и сохранять в заданных пределах свои геометрические параметры, влияющие на радиотехнические характеристики (требование по жесткости).

Характерными видами воздействий на стационарные антенны являются: ветер, климатический перепад температур, гололед, гравитационная нагрузка, сейсмическое воздействие и др. Климатические и геофизические воздействия на стационарные антенны определяются районом строительства.

Мобильные (подвижные) антенны в процессе эксплуатации подвергаются многократной передислокации. В зависимости от используемого вида транспорта для передислокации мобильные антенны делятся на наземные и корабельные.

Наземные мобильные антенны должны быть работоспособны в самых разных условиях от северных до южных широт. Для наземных антенн в качестве транспортного средства применяют колесные, гусеничные машины, железнодорожный транспорт. Поэтому кроме климатических факторов должны приниматься во внимание динамические нагрузки при транспортировании.

Всесторонний и комплексный учет функционального назначения и эксплуатации условий положен в основу методик расчета и проектирования антенных конструкций и их элементов.

1.1. Конструкции линейных антенн

По функциональным признакам конструкции линейных антенн состоят из токонесущих, силовых и опорных частей.

Токонесущими частями конструкций антенн называются такие, которые обеспечивают излучение и прием свободных электромагнитных волн, преобразуя электромагнитную энергию, подведенную от передатчика, в электромагнитную энергию, излучаемую в пространство (передающие), и наоборот (приемные).

Силовые части конструкций антенн служат для механического соединения токонесущих частей между собой и присоединения их к опорам.

Опоры предназначены для подъема токонесущих конструкций на проектную высоту и ориентацию их в пространстве.

Токонесущие части линейных антенн

Токонесущая часть антенны является рабочей частью и в соответствии с радиотехническим расчетом устанавливается на проектной высоте и с определенной пространственной ориентацией.

Наиболее распространенные типы линейных антенн (рис. 1.1 и 1.2):

- проволочные (Г-, Т-, П-образные, зонтичные, ромбические и т.д.);
- вибраторные (симметричные и несимметричные);
- пространственные логопериодические.

Самыми распространенными являются проволочные антенны — сети, подвешенные на опорах (см. рис 1.1). Полотно 1 состоит из нескольких параллельных проводников 3. Вертикальная часть антенны называется снижением 2. Полотно антенны подвешивается на стальных несущих (леерных) канатах 4. Изолируется полотно от леерных канатов и рей изоляторами 5. Рей через поводковые тросы 6 крепятся к опорам 8.

В большинстве случаев токонесущие конструкции линейных антенн выполняют из металлов высокой проводимости, а разделительные элементы, например изоляторы, — из высокочастотного диэлектрика.

В проволочных антеннах применяют провода из меди, бронзы, алюминия, фехраля и стали, а также комбинированные —

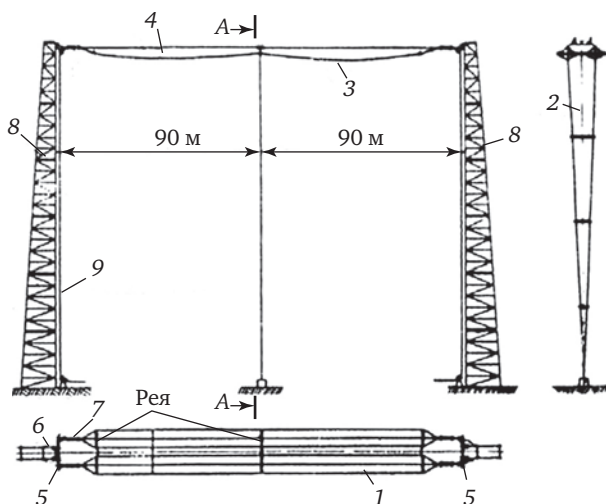


Рис. 1.1. Проволочная антенна (Т-образная):

1 — антенное полотно; 2 — снижение; 3 — проводники; 4 — канат; 5 — изоляторы; 6 — поводковые тросы; 7 — блок; 8 — опоры; 9 — подъемный трос

биметаллические: сталемедные, сталелатунные и сталелюминиевые.

Основные требования к проводам: высокая проводимость, большие пределы прочности и пластичности, а также стойкость в работе при заданных климатических условиях. Основные физико-механические свойства материалов проволок приведены в табл. 1.2.

Преимущественное распространение в антенных устройствах имеет биметаллическая сталемедная проволока диаметром 1,2...6,0 мм с медной оболочкой, минимальная толщина которой составляет 0,1...0,2 мм (в зависимости от диаметра). Такую проволоку изготавливают прокаткой и протяжкой стальной заготовки, облитой медью, или осаждением (электролитический способ) слоя меди на стальной проволоке. При больших токах используют многопроволочные провода, получаемые свивкой.

В большинстве случаев токонесущие конструкции линейных антенн выполняют из металлов высокой проводимости, а разделительные элементы, например изоляторы, — из высокочастотного диэлектрика.

В устройствах передачи средних и длинных волн применяют антенные голые медные и бронзовые провода (ГОСТ 5990—51):

1.2. Физико-механические свойства материалов проводов

Материал	Удельная масса, г/см ³	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C	Предел прочности, МПа	Предел текучести МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, МПа
Медь твердая	8,9	16,5	390...450	280...300	1,3
Бронза	8,9	18,0	500...750	350...500	1,3
Алюминий твeрдо́тянутый	2,7	23,0	150...160	70...110	0,63
Сплавы алюминия	2,7	23,0	270...350	190...230	0,56
Сталь	7,85	12,0	440	220...300	2,1

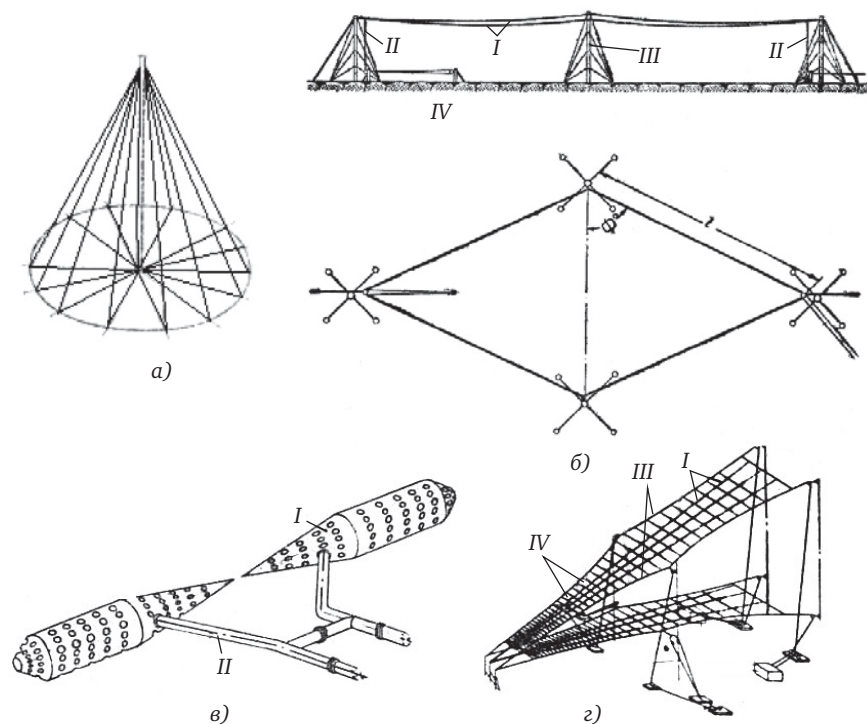


Рис. 1.2. Схемы линейных антенн:

а — зонтичная; б — ромбическая; в — симметричная вибраторная; г — логопериодическая; I — вибраторы; II — волноводы; III — леерные канаты; IV — изоляторы

ПАБ — провода антенные бронзовые; ПАБМ — провода антенные бронзовые с меньшим пределом прочности и электрическим сопротивлением; ПАМ — провода антенные медные; ПАМГ — провода антенные медные гибкие. Основные характеристики антенных проводов приведены в табл. 1.3 и 1.4.

В воздушных линиях связи наиболее часто применяют проволоку стальную специальную, медистую с содержанием меди 0,2...0,4%, обыкновенную с содержанием меди менее 0,2%, а также неизолированные медные, алюминиевые и сталеалюминиевые провода (ГОСТ 839—59). Проволока должна иметь цинковое покрытие. Для нагрузочных линий (в поглощающих сопротивлениях, реохордах и т.д.) применяют проволоку с высоким омическим сопротивлением, чаще всего изготовленную из сплава марки Х13Ю4 («фехраль»), достаточно стойкого при работе на открытом воздухе.

Для надежной работы антенных устройств важное значение имеет высокое качество электрической изоляции проводов, опор и стальных оттяжек.

Основные требования к изоляторам антенных устройств:

малая диэлектрическая проницаемость и угол диэлектрических потерь;

большая механическая прочность;

стойкость к работе при различных атмосферных условиях;

1.3. Основные характеристики антенных голых проводов

Номинальное сечение провода, мм ²	ПАБ и ПАБМ			ПАМ			ПАМГ		
	Число проволок, шт.	Диаметр, мм	Погонная масса, кг/км	Число проволок, шт.	Диаметр, мм	Погонная масса, кг/км	Число проволок, шт.	Диаметр, мм	Погонная масса, кг/км
1,5	19	1,6	15	7	1,6	14	19	1,6	14
							49	1,8	14
2,5	49	2,3	25	7	2,0	2,3	49	2,3	23
4,0	49	2,9	40	7	2,6	23,7	49	2,9	37
6,0	49	3,5	60	7	3,1	56	49	3,5	56
10,0	49	4,7	100	7	4,0	93	49	4,7	93
16,0	84	6,1	160	19	5,2	150	—	—	—
25,0	133	7,4	250	—	—	—	—	—	—

1.4. Разрывное усилие голых антенных проводов

Номинальное сечение провода, мм ²	Разрывное усилие провода, Н		
	ПАБ	ПАБМ	ПАМ и ПАМГ
1,5	950	800	520
2,5	1650	1400	870
4,0	3000	2600	1400
6,0	4500	3900	2100
10,0	7500	6500	3500
16,0	12 000	10 400	5600
25,0	18 000	16 000	—

термическая стойкость при резком изменении температуры;
отсутствие гигроскопичности;
малая хрупкость;
долговечность.

Этим требованиям удовлетворяют некоторые виды электро-технической керамики: изоляторный фарфор, радиофарфор, ультрафарфор и стеатит. Изоляторный фарфор применяют в случаях, когда диэлектрические потери не играют существенной роли. Радиофарфор, в состав которого входит окись бария, имеет тангенс угла потерь в 2—3 раза меньше изоляторного. Ультрафарфор, благодаря высокой механической прочности, малой диэлектрической проницаемости и относительно простой технологии изготовления имеет наиболее широкое распространение. Стеатит обладает более высокой по сравнению с фарфором механической прочностью и малым углом потерь, но дороже ультрафарфора.

Наиболее распространенными в проволочных антеннах являются орешковые и палочные изоляторы (рис. 1.3). Палочные изоляторы имеют высокую электрическую прочность при малой механической прочности, поэтому при необходимости их сдвигают. Орешковые, напротив, имеют высокую механическую прочность, но их электрическая прочность невелика. При пространственной развязке используют крестообразные и другие виды изоляторов.

Для соединения между собой отдельных проводов и секций трактов антенн в целях получения надежного электрического контакта и предупреждения возможного перемещения проводов в местах их крепления применяется пайка. Пайка низкотемпера-

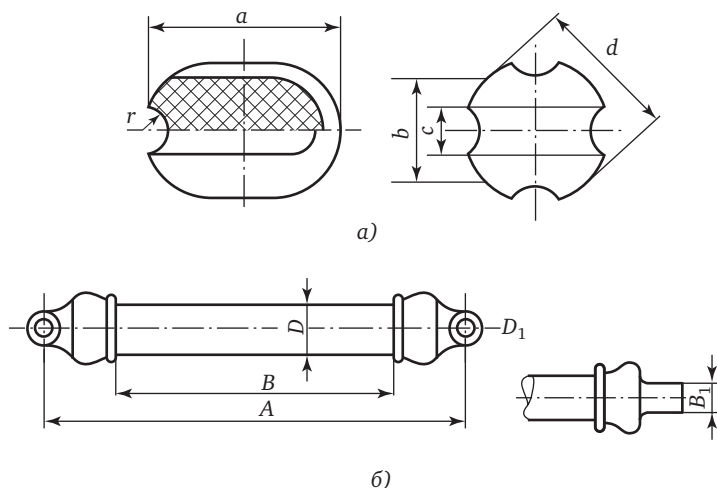


Рис. 1.3. Орешковый (а) и палочный (б) изоляторы:

a, d — габаритные размеры; b — размер электрического сопротивления; c — ширина канавки; A — присоединительный размер; B — длина изолятора; D — диаметр изолятора; D_1 — диаметр отверстия проушины; B_1 — ширина проушины

турными припоями не может обеспечить достаточно надежной механической прочности соединений, подвергающихся воздействию механических нагрузок, поэтому применяется либо в сочетании с механической заделкой, либо полностью заменяется сваркой. Для получения необходимой формы сварных узлов сварку выполняют в приспособлениях, которые надежно фиксируют требуемое взаиморасположение деталей.

Соединение неразъемных частей отдельных деталей тракта в узел обычно осуществляют электродуговой сваркой. Это наиболее распространенный вид сварки. Промышленностью хорошо освоен выпуск как стационарного, так и подвижного оборудования, поэтому сварка может выполняться не только в заводских, но и в полевых условиях.

Силовые части линейных антенн

Силовые конструкции размещаются между токонесущими проволочными структурами антенны и ее опорами. Силовые части линейных антенн:

- элементы крепления токонесущих проволочных структур к опорам;
- конструкции соединений элементов проволочных структур между собой.

Крепление токонесущих конструкций линейных антенн к опорам может быть неподвижным и подвижным. При неподвижном креплении токонесущие конструкции антенны являются неотъемлемой механической частью общей системы всего антенного комплекса. В процессе настройки или замены антенные структуры открепляются от специальных зажимов и опускаются. Провисание антенн этого типа в процессе эксплуатации происходит вследствие удлинения, вызванного изменением усилия в элементах антенны, или вследствие изменения температуры. При подвижном креплении антенных сетей к опорам их провисание в процессе эксплуатации изменяется вследствие смещения леерных канатов вместе с контргрузами, перемещающимися по высоте.

Антенны с контргрузами могут быть двух типов: первый — контргруз все время висит на канате, благодаря чему усилие остается постоянным, и антенна изменяет свою длину при приложении внешних нагрузок; второй — масса контргруза превышает усилие в канате (рис. 1.4). При небольших внешних нагрузках контргруз лежит на специальных упорах и начинает перемещаться лишь после увеличения усилия в леерном канате. Достоинством такого решения является отсутствие максимальной нагрузки от контргрузов на сеть при обычном режиме эксплуатации (малых скоростях ветра и незначительных отложениях гололеда).

Регулирование натяжения проводов и стрелы провисания проволочных антенн при сезонных коле-



Рис. 1.4. Подвижное крепление антенного полотна:

- 1 — контргруз; 2 — упор;
3 — канат; 4 — блок

баниях температуры может быть автоматически обеспечено за счет применения термокомпенсатора, например, вставки из сплава с памятью (рис. 1.5). В охлажденном состоянии (в зимних условиях) вставка 1 из сплава с памятью находится в растянутом состоянии. Провод 2 при нагреве (летом) удлиняется из-за термического расширения. Это удлинение приводит к значительному увеличению стрелы провисания 3. Нагрев термокомпенсирующего элемента из сплава с памятью приводит к сокращению общей длины провода, увеличению усилия натяжения и уменьшению стрелы провисания.

Кроме регулирования провисания проводов при изменении температуры компенсатор может быть использован для борьбы с обледенением. С этой целью компенсатор подключают к источнику энергии. Нагрев, например электрическим током, и сопутствующее нагреву резкое изменение его длины вызывает колебание проводов и обеспечивает сброс наледеневших отложений.

Соединение элементов проволочных структур осуществляется с помощью изоляторов и специальных конструкций для крепления проводов, рей и леерных канатов.

Для обеспечения электрического контакта концы проводов соединяют пайкой. При пайке применяют оловянно-свинцовые

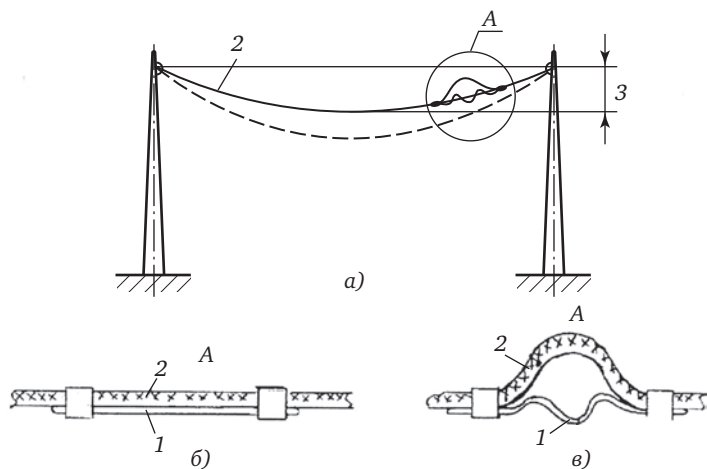


Рис. 1.5. Проволочные антенны с компенсатором (а) и состояние компенсатора при охлаждении (б) и нагреве (в):
1 — компенсатор из сплава с памятью; 2 — провод; 3 — стрела провисания

(ПОС30, ПОС40) и серебряные (ПСр10, ПСр45, ПСр65, ПСр72) припои. Для повышения механической прочности соединяемые концы обматывают мягкой отоженной медной, биметаллической, а также специальной стальной перевязочной и спаечной проволокой. Концы проводов, присоединяемых к несущим конструкциям (рея, леерный канат и т.д.), выполняют в виде петли (рис. 1.6).

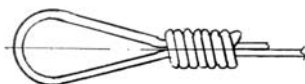


Рис. 1.6. Петлевой тип крепления проводов

Монтажные концы канатов закрепляют следующими способами: с помощью петли и зажимов; с помощью петли, образованной вплетением свободного конца в корневой; с помощью петли и втулки-зажима; заливкой конца каната во втулку-муфту; с помощью клинового зажима. Соединения с помощью зажимов бывают дужковые (рис. 1.7, а) и плашечные (рис. 1.7, б).

Плашечные зажимы проще в изготовлении и поэтому более широко распространены. Расстояние в свету между стяжными болтами у обоих типов зажимов принимается равным диаметру канатов плюс 2...5 мм. Число зажимов и расстояние между ними при закреплении петли приведены в табл. 1.5.

1.5. Число зажимов и расстояние между ними

Диаметр каната, мм	До 10,0	12,5...15,5	17,5	19,5	21,5	24	28	34,5	37,0
Число зажимов, шт.	2	3	3	4	4	5	5	7	8
Расстояние между зажимами, мм	100	100	120	120	140	150	180	230	250

Число зажимов для сращивания канатов увеличивают против указанных в таблице вдвое — для канатов малых диаметров и на одну-две штуки — для канатов средних диаметров. Зажимы надежно работают при степени сжатия каната, примерно равной 0,6 или меньше. При этом следует иметь в виду, что повышение степени сжатия снижает срок службы каната. Понижение прочности может составлять до 30% в зависимости от качества выполнения закрепления.

Вплетание свободного конца в корневой (см. рис. 1.7, в) осуществляют вручную с помощью специального инструмента (шило, свайка и др.). Место сплетки иногда обматывают парусиной и покрывают защитным составом, например дегтем. Длина сплетки должна быть не менее $30d$, где d — диаметр каната. При качествен-

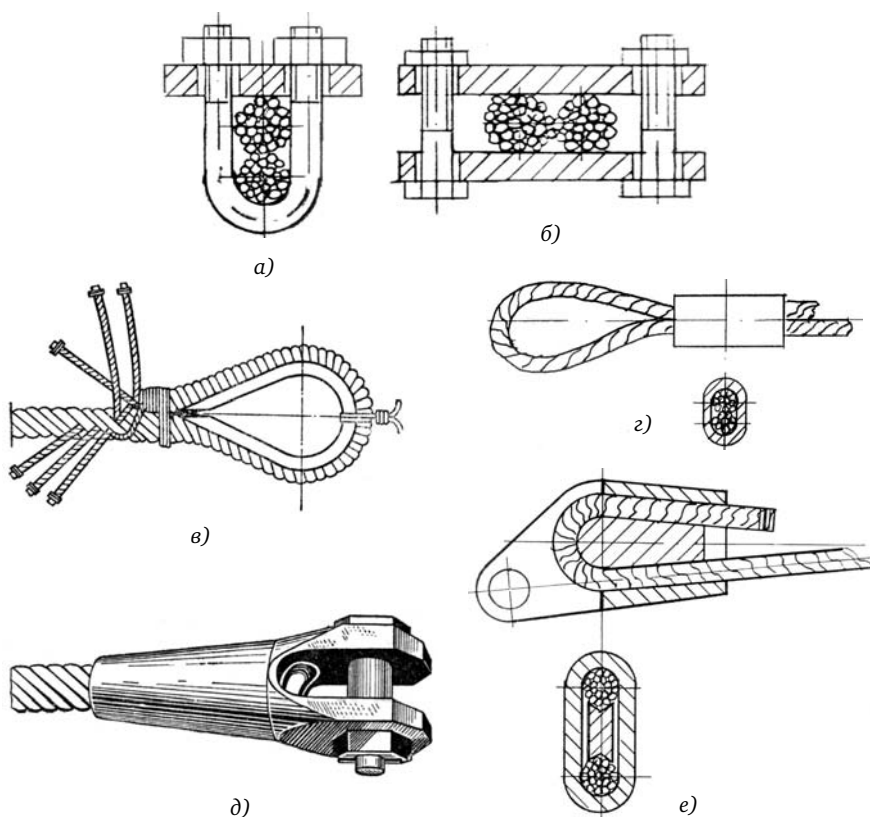


Рис. 1.7. Типы и виды крепления канатов:

а — дужковые и *б* — плащечный зажимы; *в* — петлевой (вплетением каната);
г — втулка-зажим; *д* — втулка-муфта; *е* — клиновый зажим

но выполненном монтаже петли прочность заделки составляет около 70...80% агрегатного разрывного усилия каната.

В качестве втулок-зажимов (см. рис. 1.7, *г*) используют трубки из мягкой стали круглого или овального сечения. Соединение осуществляют опрессовкой в специальном прессе или специальным рычажным механизмом (при работе в полевых условиях). Этот метод опрессовки, не понижающий прочность каната в соединении, наиболее часто используют для канатов небольших диаметров (3...8 мм).

Закрепление концов каната заливкой в конической или цилиндрической втулке применяют для канатов без сердечника из специальных материалов (см. рис. 1.7, д). Втулки изготавливают стальными литыми или сварными (ГОСТ 7372—55). Обработанными частями втулки являются щеки и отверстия для пальца. Закрепление каната во втулку производят следующим образом: во втулку продевают канат, затем распускают проволоки и на их концах загибают крючки. Распущенный конец каната затягивают во втулку и закрепляют ее в вертикальном положении. После нагрева втулки до 300...350°C канат заливают сплавом ЦАМ9-1,5, АЦ-13-2 или УК-9. Выполненное таким образом соединение обычно не понижает прочности каната и используется для канатов диаметром более 10 мм.

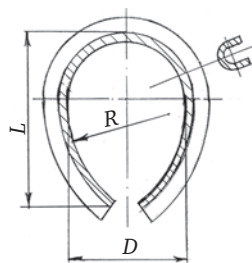


Рис. 1.8.
Геометрические
параметры коуша:
 R — радиус кривизны;
 D, L — размеры коуша

Клиновые зажимы (см. рис. 1.7, е) применяют для подвески стальных тросов. Они состоят из корпуса и двойного клина. При натяжении клин прижимает трос к корпусу, что обеспечивает надежную заделку без снижения нагрузочной способности каната. Такое соединение, как и соединение с помощью зажимов, позволяет регулировать натяжение (длину) каната в процессе эксплуатации.

Для увеличения срока службы каната в петлях применяют коуши, предохраняющие проволоки от истирания (рис. 1.8). На коуше канат изгибается по дуге, что уменьшает дополнительные напряжения при изгибе и повышает прочность заделки.

Как правило, проволочные структуры антенн крепят к реям (рис. 1.9). Реи выполняют из стальных труб диаметром до 120 мм. При больших нагрузках используют стальные фермы, при малых — деревянные. Реи неподвижно крепят к стволу мачты (башни). Для уменьшения качания концы рей крепят к стволу с помощью поводков. Если число проводников в антенне велико, применяют подреи, к каждой из которых крепится часть полотна. Подреи крепят к рее и соединяют одну с другой перемычкой (гибким проводом), которая при этом уменьшает ее закручивание.

Снижение сети также крепят к рее. Электрический контакт между горизонтальным полотном и снижением осуществляют пай-

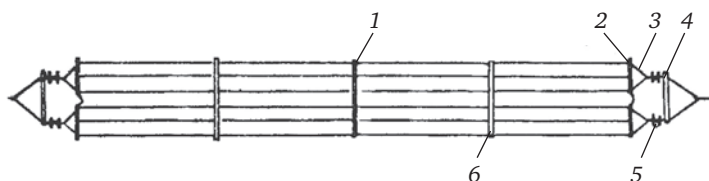


Рис. 1.9. Антенное полотно:

1 — рея снижения; 2 — подря; 3 — перемычка (поводок); 4 — рея;
5 — изолятор; 6 — промежуточная рея

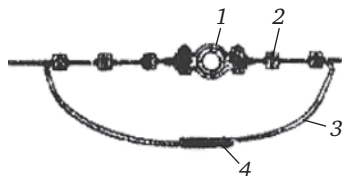


Рис. 1.10. Соединение проводов:

1 — рея снижения; 2 — зажим;
3 — провод; 4 — спайка проводов

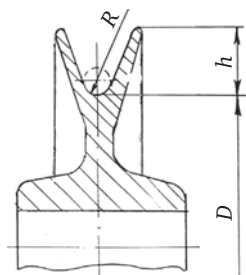


Рис. 1.11. Блок:

D — диаметр блока; R — радиус канавки; h — высота реборды

кой концов провода, выпущенных после зажима, т.е. не несущих механической нагрузки (рис. 1.10). По высоте снижения устанавливаются распорки, поддерживающие взаимное расположение проводов.

Сеть поднимают на канате, пропущенном через блок (рис. 1.11), закрепленный на рее или мачте. Диаметр D блока принимается из условия $D \geq 10d$, где d — диаметр каната. С увеличением диаметра блока долговечность канатов возрастает. Радиус канавки блока принимается равным $R = 0,52...0,53 d$, высота реборды $h \geq 6d$.

Леерные канаты служат для поддержания токонесущих частей антенны и обеспечивают их крепление к опорам или лебедке. В случае подвески широкого полотна (несколько десятков метров), вместо рее (рис. 1.12) используют леерные канаты.

Леерный канат является одним из наиболее ответственных элементов проволочных антенн. Выход его из строя может привести к аварийной ситуации (перегрузке опор и др.), поэтому требует высокой точности расчетов при проектировании.

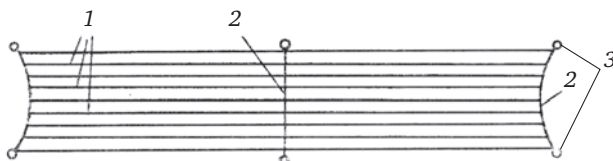


Рис. 1.12. Подвеска широкого полотна:
1 — провода; 2 — леерные тросы; 3 — мачты

Для изготовления лееров используют стальные оцинкованные канаты. Модуль упругости стального каната E_B меньше модуля упругости стали E :

$$E_B = \nu E,$$

где $\nu = 0,35 \dots 0,60$ — для канатов двойной свивки; $\nu = 0,65 \dots 0,85$ — для канатов одинарной свивки.

Верхняя граница относится к канатам, подвергшимся предварительной вытяжке, превышающей на 20% максимальную эксплуатационную.

Прочность каната определяется разрывным усилием $T_{\text{раз}}$ каната (ГОСТ 7372—55). Расчет на прочность каната ведется на растяжение, исходя из запаса прочности $n = T_{\text{раз}}/T$, где T — сила растяжения каната.

Для неподвижных оттяжек минимальный запас прочности принимается равным 3.

Подъем сети в рабочее положение осуществляют с помощью лебедок. Для уменьшения горизонтальной нагрузки на опору лебедки переносят от основания опоры на расстояние, приблизительно равное высоте опоры. Чаще всего применяют ручные лебедки, так как сеть опускают очень редко — для периодического осмотра и исправления повреждений. Для подъема сложных и тяжелых сетей применяют электролебедки. Грузоподъемность лебедки выбирают по наибольшей нагрузке сети на подъемный канат. Для уменьшения нагрузки на лебедку используют полиспасть.

Конструкции опор

Опоры служат для подвешивания к ним токонесущих конструкций линейных антенн, установки апертурных антенн и других видов оборудования. Опоры могут быть собственно антеннами в том

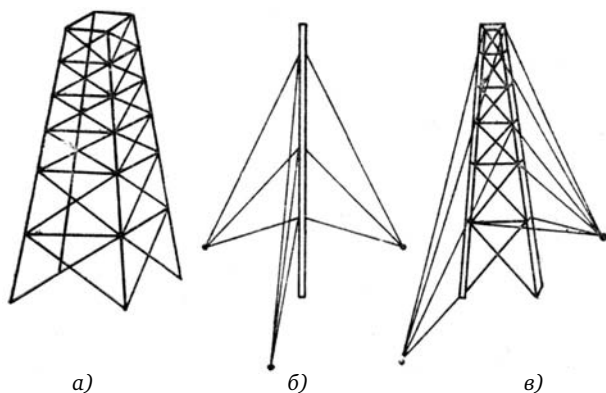


Рис. 1.13. Виды опор:

а — башня; *б* — мачта; *в* — комбинированная опора

случае, когда они являются излучателями электромагнитной энергии. Опоры делятся на следующие виды (рис. 1. 13):

- башни — вертикально стоящие консольные балки, закрепленные на фундаменте;
- мачты — центрально расположенный ствол и поддерживающие оттяжки, являющиеся для него упругими опорами;
- комбинированные опоры — в одном направлении работают как башня, в другом — как мачта.

Конструкции башен

Башни, как правило, выполняют в виде стальных или алюминиевых решетчатых и трубчатых конструкций. Высокие башни могут быть выполнены из железобетона. При большей стоимости (в 1,5...3,0 раза) и металлоемкости (в 2,0...2, 5 раза) достоинством башен перед мачтами является малая площадь для их размещения.

Для изготовления башен применяют различные марки стали; при температурах эксплуатации до -40°C — общестроительные марки, при более низких температурах — низколегированные стали или алюминиевые сплавы.

Для изготовления башен и мачт применяют типовой сортамент: швеллеры, уголки и трубы. Использование стальных труб для снижения ветровой нагрузки позволяет уменьшить стоимость сооружения и тем значительнее, чем больше доля ветровой нагрузки в общей нагрузке на конструкцию.

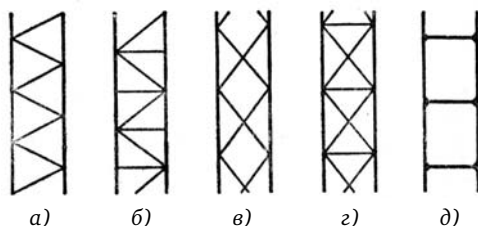


Рис. 1.14. Схемы вариантов решетки ствола опоры:

a — треугольная (раскосная); *б* — треугольная с распорками; *в* — с перекрещивающимися раскосами; *г* — то же, но распорками; *д* — безраскосная

Для соединения стержней и обечаек трубчатых стволов применяют электросварку, клепку, болты (обычные или высокопрочные). Сварные конструкции башен и мачт легче клепаных и болтовых на 10...15% и менее трудоемки в изготовлении.

Ствол ферменных конструкций (схемы решеток приведены на рис. 1.14) имеет треугольное или квадратное сечение (последнее проще в изготовлении, более жесткое на кручение, но более металлоемкое). Масса четырехгранной башни примерно на 10% больше массы трехгранной. Конструкции с большим числом граней в сечении применяют при высоте башен более 300 м.

Размер основания опор для подвески сети должен составлять 0,15...0,20 высоты башни, а опор, не несущих больших поперечных нагрузок (воспринимающих преимущественно ветровую нагрузку), — 0,05...0,12. Диаметр основания цилиндрических или конических железобетонных башен принимают равным 0,06...0,10 их высоты.

Оптимальные схемы ствола башни, сечение стержней определяют вариативным проектированием, учитывая при этом упругоподатливый фундамент, условия транспортировки и монтажа.

Конструкции мачт

Решетчатые мачты имеют поперечное сечение в виде равностороннего треугольника или квадрата, а сплошностенчатые — круглое. Трехгранные мачты, как правило, расчаливают по трем направлениям оттяжек (вант) в плане, четырехгранные — по четырем (рис. 1.15), при круглом сечении ствола — по трем или четырем. Угол наклона оттяжек мачты к горизонту составляет 45...60°.

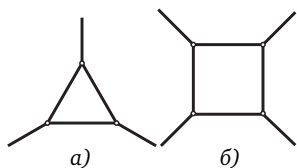


Рис. 1.15. Схемы крепления оттяжек к стволу мачты:
а — трехгранное, б — четырехгранное сечения ствола

Ствол мачты разбивают по высоте на секции, размеры которых определяются условиями транспортирования (рис. 1.16). Для исключения деформации сечения ствола на нем устанавливают диафрагмы (рис. 1.17) с шагом $h = (2,5 \dots 3,0)b$, где b — размер поперечного сечения секции. Оттяжки располагают на поясах решетчатого ствола или снаружи трубчатого — в местах соединения двух соседних секций, т.е. в местах наибольшей жесткости. Крепление оттяжек к грунту осуществляют с помощью анкеров (якорей). Анкеры стационарных опор — это железобетонные плиты с тягой или гладкие и винтовые сваи (рис. 1.18). Ствол мачты закрепляют на центральном фундаменте с помощью закладных конструкций. Натяжение оттяжек осуществляют с помощью лебедок, талрепов или натяжных устройств мостового типа.

Поперечные размеры сечения ствола определяют из условия обеспечения предельно допустимой гибкости пролета между яру-

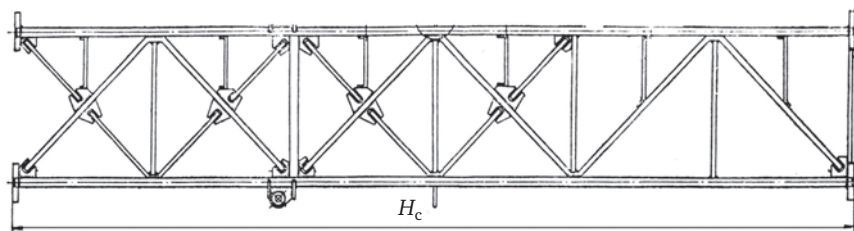


Рис. 1.16. Секция ствола мачты, подготовленная к транспортировке

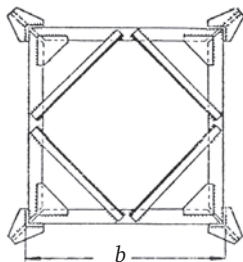


Рис. 1.17. Диафрагма секции мачты

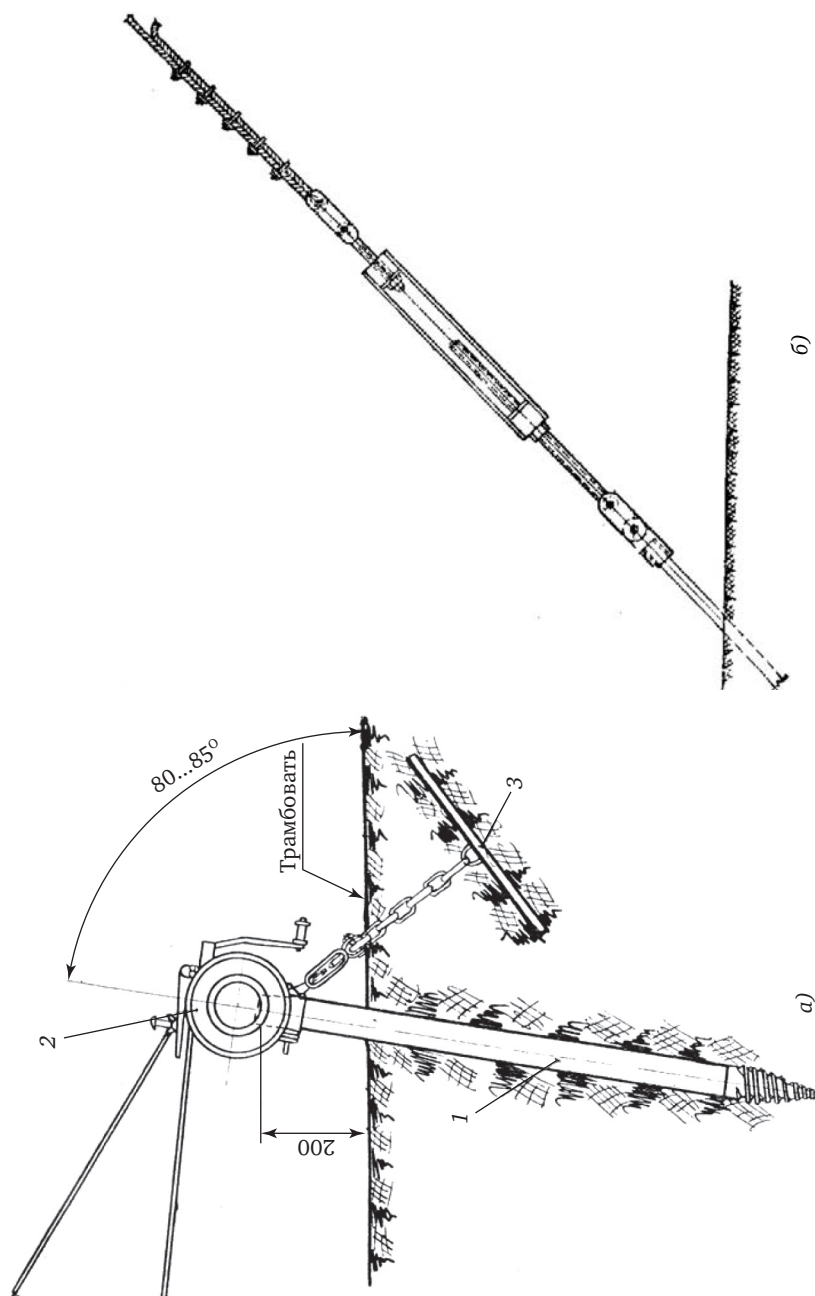


Рис. 1.18 (начало). Схемы натяжения оттяжек

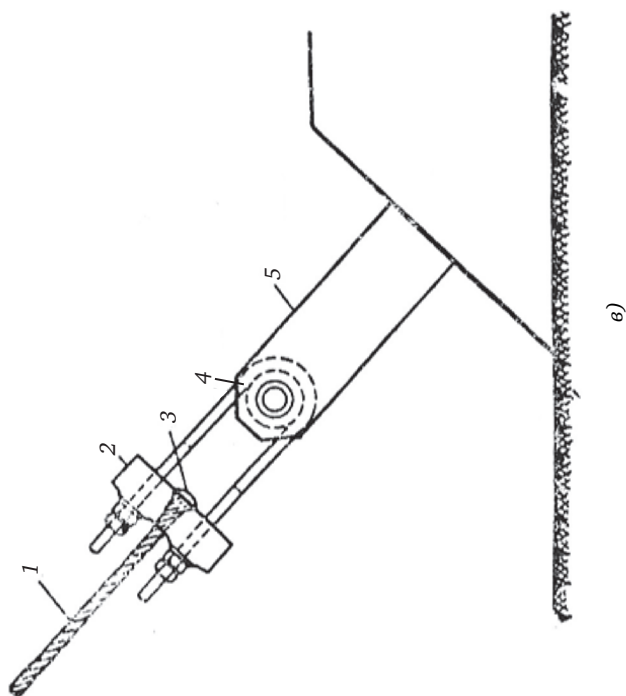


Рис. 1.18 (окончание). Схемы натяжения оттяжек:

а — лебедкой (1 — анкер, 2 — лебедка, 3 — якорь); б — талрепом (1 — оттяжка, 2 — зажим дужковый, 3 — винтовая стяжка, 4 — соединительное звено, 5 — тяга якоря); в — с помощью устройства мостового типа (1 — оттяжка, 2 — траверса, 3 — заливка каната, 4 — болт, 5 — тяга)

сами оттяжек — λ : для мачт высотой до 60 м $\lambda = 60 \dots 100$ с небольшими нагрузками $\lambda = 300$ и более; для мачт высотой до 100 м — $\lambda = 120 \dots 150$; для высоких мачт (высотой более 100 м). Уменьшение поперечных размеров ствола и поясов ведет к снижению ветровой нагрузки, за счет чего достигается большой положительный эффект.

Оттяжками мачт служат стальные оцинкованные канаты спиральной одинарной или двойной свивки со стальным сердечником. Модуль упругости канатов составляет $(1,1 \dots 1,8) 10^5$ МПа и увеличивается в процессе эксплуатации в результате вытяжки каната.

Для стабилизации жесткости мачты канаты подвергают предварительному натяжению с нагрузкой, превышающей расчетную на 10...20%. Оттяжки мачт снабжают регулировочными приспособлениями: лебедками и талрепами — для создания и поддержания монтажного (начального) натяжения, которое обеспечивает допустимый предельный прогиб при эксплуатационной нагрузке.

1.2. Методы расчета элементов (частей) опор линейных антенн

Расчет токонесущих конструкций проволочных антенн

Напряженно-деформированное состояние проводов, леерных канатов, рей, опор и других элементов антенных устройств зависит от следующих видов нагрузок:

- **собственная масса проводов и канатов;**
- **сосредоточенная нагрузка от массы изоляторов и других элементов, подвешенных к леерному канату;**
- **масса гололеда;**
- **ветровая нагрузка;**
- **монтажное или предварительное натяжение;**
- **нагрузка от перепада температур;**
- **сейсмическое воздействие (особый вид нагрузки).**

Провод или канат при проектировании рассчитывается как стержень, длина которого на несколько порядков превышает его диаметр, а его расчетной моделью принимается гибкая нить.

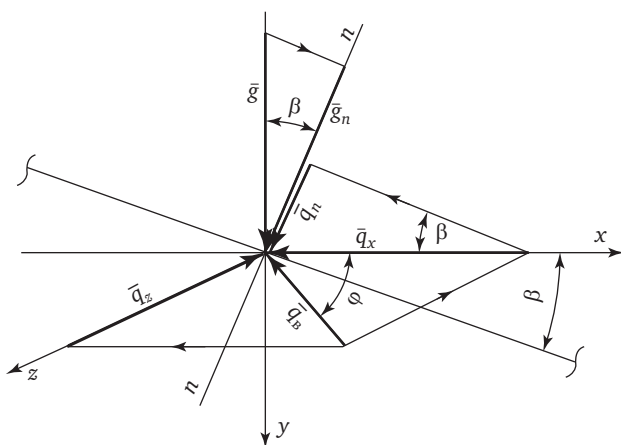


Рис. 1. 19. Схема расчета нагрузок на гибкую нить

Для расчета напряженно-деформированного состояния проволочных антенн нагрузку выражают как нормальную составляющую к хорде нити. В расчетной модели принимается, что на нить действуют весовая (вертикальная) и ветровая (горизонтальная), ортогональная ей, нагрузки. Нормальная к хорде составляющая весовой нагрузки действует в вертикальной плоскости и равна $g_n = g \cos \beta$ (рис. 1.19). Ветровая нагрузка направлена под углом φ к плоскости подвески нити. При этом проекция нагрузки q_B на ось z , перпендикулярную плоскости оттяжки, равна $q_z = q_B \sin \varphi$, а на ось, лежащую в плоскости оттяжки $q_x = q_B \cos \varphi$, а ее проекция на нормаль n к хорде равна $q_n = q_B \cos \varphi \sin \beta$.

Таким образом получаем три составляющие исходных сил, две из которых параллельны нормали к хорде nn , а третья — оси z . Векторная сумма этих сил дает искомый вектор суммарной нагрузки, модуль которого

$$W = \sqrt{(g \cos \beta + q_B \cos \varphi \sin \beta)^2 + (q_B \sin \varphi)^2}.$$

При учете воздействия нагрузки от сосредоточенных сил (например, масса изоляторов), их влияние учитывают введением эквивалентной распределенной нагрузки из условия равенства площадей эпюр изгибающих моментов фиктивных балок $M(P)$ с длиной пролета, равной хорде нити L . При этом

$$W_{\text{экр}} = \frac{12}{L^3} \int_L M(P) dx.$$

Тогда полная распределенная нагрузка на нить равна $W_{\Sigma} = W\eta$, где $\eta = 1 + W_{\text{экр}}/W$.

Ветровые нагрузки вызывают вибрации проводов и канатов. Для расчета на вибрацию необходимо знать собственную частоту колебаний. В зависимости от стрелы провеса f и натяжения нити используются следующие зависимости:

при большой стреле провеса ($f \geq 0,1L$)

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{2g}{f}};$$

если начальное натяжение достаточно велико так, что его изменение при колебаниях незначительно, а $f < 0,05L$, то

$$\omega_{01} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T_0}{\bar{m}}},$$

где $\bar{m}$ — погонная масса; T_0 — натяжение нити.

Логарифмический декремент колебаний для проводов и канатов при расчете принимается равным $\delta = 0,05 \dots 0,15$ (большие значения — для канатов).

Расчет силовых конструкций. Крепление конструкции линейных антенн к опорам может быть неподвижное и подвижное. При неподвижном креплении натяжение и стрела провисания меняются при изменении нагрузки или температуры. При подвижном креплении натяжение полотна обеспечивается контргрузами и не зависит от температуры. Усилие в этом случае остается постоянным.

Подвеска контргрузов бывает двух типов: контргруз постоянно висит на канате; контргруз лежит на специальных упорах. При этом только часть его массы создает усилие в канате. С увеличением усилия (возрастание внешней нагрузки) контргруз начинает перемещаться, уравнивая приращение усилия. Достоинством последнего варианта является меньшая нагрузка на сеть при обыч-

ном режиме эксплуатации (малые скорости ветра, небольшое обледенение).

Другим способом ограничения передачи нагрузки от антенны на опоры является подвеска сети на электролебедках с автоматическим регулированием натяжения каната. Специальный прибор (дриллометр) поддерживает заданную величину натяжения каната и при перегрузках включает привод лебедки.

Конструкции антенн должны удовлетворять требованию прочности в экстремальных условиях эксплуатации и сохранять в заданных пределах свои геометрические параметры, влияющие на радиотехнические характеристики. В соответствии с этим ведется расчет на прочность и деформативность.

Прочность токонесущих проводов и леерных канатов определяется усилием натяжения T , а деформативность — максимальной стрелой провисания f . При проектном расчете последовательно задаются значением диаметра провода, после чего выбирают оптимальный вариант. Длина пролета определяется из радиотехнического расчета. Дальнейший поверочный расчет ведется в зависимости от вида крепления антенны к опорам.

Подвижное крепление. При таком креплении натяжение нити постоянно ($T = T_0 = \text{const}$) и определяется массой контргруза. Стрела провеса не зависит от температуры и будет максимальной при максимальной эксплуатационной нагрузке. Поэтому, задаваясь допустимой стрелой провеса, можно определить натяжение нити и вес контргруза:

$$T_0 = \frac{W_1 L^2}{8[f]}.$$

Если условие прочности $T_{\text{раз}}/T_0 = n \geq [n]$ не обеспечивается, задается другим диаметром провода и повторяют расчет.

Неподвижное крепление. При неподвижном креплении рассматривают следующие расчетные случаи нагрузок:

1. Максимальная ветровая нагрузка, максимальная эксплуатационная температура.
2. Гололед, ветровая нагрузка при гололеде, температура воздуха при гололеде.
3. Максимальная ветровая нагрузка, минимальная эксплуатационная температура.

Первый и второй расчетные случаи определяют максимальную стрелу провеса, второй и третий — максимальное натяжение нити.

Последовательность расчета:

а) по заданной стреле провеса определяют натяжение нити, соответствующее первому расчетному случаю:

$$T_{11} = \frac{W_1 L^2}{8[f]} \quad \text{или} \quad \sigma_{11} = \frac{p_1 L^2}{8[f]},$$

где $p_1 = W_1/F_B$, F_B — площадь сечения нити;

б) определяют величину начального натяжения $T_0 = \sigma_0 F_B$, соответствующего нагрузке и температуре монтажа ($\Delta t_{10} = t_{\max} - t_0$):

$$\sigma_0 - \frac{p_0^2 L^2}{24\sigma_0^2} E_B = \sigma_{11} - \frac{p_1^2 L^2}{24\sigma_1^2} E_B + \frac{\Delta L_{10}}{L \cos \beta} E_B,$$

где ΔL_{10} — температурное удлинение нити;

в) по найденному начальному натяжению определяют натяжение T_{12} , соответствующее второму, и T_{13} , соответствующее третьему расчетному случаю;

г) по наибольшей из найденных величин проводится проверка прочности нити;

д) определяется стрела провеса, соответствующая второму расчетному случаю.

Если условие прочности или деформативности не выполняется или запас прочности велик, задаются другим диаметром нити и повторяют расчет.

Неподвижное крепление с термокомпенсатором

Последовательность расчета:

а) проводится расчет так же, как и для неподвижного крепления;

б) определяется температурное удлинение нити для разницы предельных значений эксплуатационных температур:

$$\Delta L = \alpha L (t_{\max} - t_{\min});$$

в) по заданным значениям предельных эксплуатационных температур подбирается сплав с памятью для термокомпенсирующей вставки исходя из следующего:

$$A_K \geq t_{\max}; M_H > t_{\min}; t_{\min} > A_H > t_{\max},$$

где A_H, A_K — температуры начала и конца аустенитных превращений; M_H — температура начала мартенситных превращений;

г) определяется температурный коэффициент регулирования и остаточная стрела провеса f_p :

$$k_p = \frac{A_H - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad f_p = k_p f;$$

д) проводится расчет термокомпенсатора, исходя из следующих условий:

$$P_{AK} \geq T_{13}; P_{MH} \leq 0,7T_{13}; \Delta L = \lambda_p = (1 - k_p)\Delta L \quad (1.1)$$

где P_{AK} — усилие термокомпенсатора при температуре A_K ; P_{MH} — усилие термокомпенсатора при температуре M_H ; λ_p — рабочий ход термокомпенсатора.

Расчет зависит от конструкции термокомпенсатора. Целесообразно использовать термокомпенсатор в форме цилиндрической витой пружины. В этом случае расчет ведется исходя из базового соотношения:

$$\lambda = 2\pi n P^m R^{\frac{2m+1}{m}} \left\{ \left[\frac{(\cos \alpha)^{2m+2}}{GI_{kp}^*} \right]^{\frac{1}{m}} + 0,5 \left[\frac{(\sin 2\alpha)^{m+1}}{2EI_x^*} \right]^{\frac{1}{m}} \right\}, \quad (1.2)$$

где R — радиус витка пружины; n — число рабочих витков; α — угол подъема витка; r_0 — радиус проволоки; E, G — модули упругости соответственно первого и второго рода; I_{kp}^*, I_x^* — полярный и осевой моменты инерции сечения соответственно:

$$I_{kp}^* = \frac{2\pi}{m+3} r_0^{m+3}; \quad I_x^* = 1,02 r_0^{m+3}.$$

Например, для сплавов системы никель — титан соответственно при температуре M_H — M_K и A_H — A_K ; $E_M = 330$ МПа, $E_A = 1800$ МПа; $G = E/3$; m — параметр, зависящий от температуры — в мартенситной и аустенитной фазах $m_M = 1/8$; $m_A = 1/3$ соответственно.

Расчет пружины ведется методом последовательных догрузений, согласно которому, задаваясь шагом нагружения ΔP_i , опре-

деляется приращение перемещения $\Delta\lambda_i$. На каждом последующем шаге предварительно используется значение угла α_i , определенное на предыдущем шаге по формуле

$$\alpha_i = \arctg \frac{l_0 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta\lambda_k}{2\pi n R},$$

где l_0 — начальная длина пружины.

Для расчета по этой методике формула (1.2) преобразуется к виду

$$\Delta\lambda_i = 2\pi n \Delta P^{\frac{1}{m}} R^{\frac{2m+1}{m}} \left\{ \left[\frac{(\cos \alpha_{i-0,5})^{2m+2}}{GI_{кр}^*} \right]^{\frac{1}{m}} + 0,5 \left[\frac{(\sin 2\alpha_{i-0,5})^{m+1}}{2EI_x^*} \right]^{\frac{1}{m}} \right\}, \quad (1.3)$$

где $\alpha_{i-0,5} = 0,5(\alpha_{i-1} + \alpha_i)$.

Полное удлинение пружины и усилие деформирования (восстановления) на i -м шаге составит

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^i \Delta\lambda_k; \quad P_i = \sum_{k=1}^i \Delta P_k. \quad (1.4)$$

Расчет термокомпенсатора из сплава с памятью ведется в такой последовательности:

а) подставляя $E = E_M$; $G = G_M$; $m = m_M$ в формулы (1.3) и (1.4) определяют исходное удлинение пружины $\varepsilon_{и}$, соответствующее относительной деформации $\varepsilon_{и} = 0,06$:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_i}{E} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (1.5)$$

где

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{M_{и} r_0^m}{I_x^*} \right)^2 + \left(\frac{M_{кр} r_0^m}{I_{кр}^*} \right)^2};$$

$$M_{и} = 0,5PR \sin 2\alpha; \quad M_{кр} = PR \cos^2 \alpha;$$

б) определяют $P_{\text{Мн}}$, соответствующее $\lambda = \lambda_{\text{и}}$, и проверяют на условие (1.1);

в) для значений $E = E_A$; $G = G_A$, $m = m_A$ по формулам (1.3), (1.4) определяют λ_{02} и $P_{\text{Ак}}$, соответствующие $\varepsilon = 0,02$, и проверяют на соответствие условию (1.1);

г) определяют величину рабочего хода $\lambda_p = \lambda_{\text{и}} - \lambda_{02}$ и проверяют на условие (1.1).

Если какое-либо из условий (1.1) не выполняется, задаются другими параметрами термокомпенсатора и повторяют расчет.

Расчет рей

Если число горизонтальных проводников в антенне более одного, то антенна крепится к опоре с помощью рей. Рейя представляет собой балку, выполненную, как правило, из стальной трубы, к которой крепятся концы проводников антенны (рис 1.20).

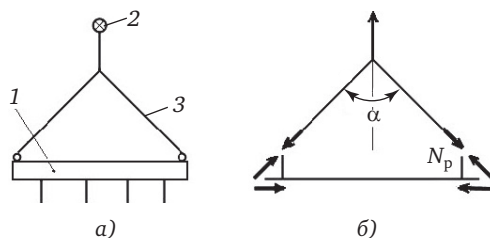


Рис. 1.20. Модель и расчетная схема рей:
 а — крепление рей к опоре; б — расчетная схема;
 1 — опора; 2 — рейя; 3 — трос

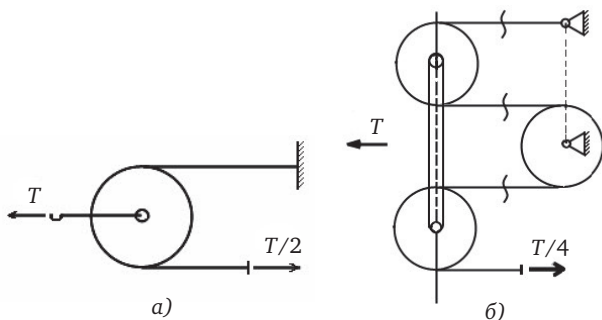


Рис. 1.21. Полиспасты:
 а — с кратностью 2; б — с кратностью 4

На рею действуют поперечная (вызывает изгибающий момент) и продольная силы. Продольная сила

$$N_p = N \operatorname{tg} \alpha / 2,$$

где N — сила натяжения каната; α — угол между направлениями ветвей петли.

Расчет лебедок заключается в расчете монтажного натяжения троса и выбора серийно выпускаемой лебедки. Если нагрузка превышает допустимую для данного типа лебедки, применяют полиспаст (рис. 1.21).

Электралебедки применяют для подъема сложных тяжелых сечет. Грузоподъемность лебедок выбирают по наибольшей нагрузке сети на подъемный канат.

Расчет башен

При расчетах башня рассматривается как сжатоизогнутый вертикальный стержень, упруго защемленный с помощью фундамента в грунте.

Решетчатая башня — пространственная конструкция, неотделимая в расчетах от фундаментов. Расчет такой конструкции с учетом совместной работы всех ее стержней и фундаментов возможен только с применением численных методов.

Для проведения приближенных расчетов башню расчленяют на плоские секции ствола и фундамент. Такая схема расчета башни приводит к увеличению расчетных параметров, так как при этом принимают наибольшие величины нагрузок. Расчет башни разложением ее на плоские грани приводит к значительным ошибкам, так как в этом случае не могут быть учтены силы, действующие в перпендикулярном направлении к граням.

При определении ветровой нагрузки ствол делят на участки, кратные размеру секций, а нагрузка принимается как сосредоточенная. Коэффициенты — высотный и пульсации — принимаются для середины каждого участка постоянными по высоте. При учете пульсации скоростного напора ветра башня рассматривается как плоский консольный стержень.

Для определения коэффициента динамичности при проектном расчете период собственных колебаний решетчатой башни определяется по эмпирической формуле

$$T = 0,01H \sqrt{\frac{g_c + g_{об}}{g_c}}, \quad (1.6)$$

где H — высота башни; g_c — погонная масса основных элементов ствола; $g_{об}$ — масса оборудования башни, отнесенная к единице высоты ствола.

При поверочном расчете период первой формы собственных колебаний башни находят по формуле

$$T_{01} = 2,2 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n G_j y_j^2}{y_{j=n}}},$$

где y_j — ордината горизонтального прогиба центра массы груза G_j при действии единичной горизонтальной силы, приложенной к верху башни (начало отсчета — у заделки).

Чтобы не допустить образования продольных трещин, применяют поперечное армирование и закрепление стальной конструкции в железобетонной трубе. Коэффициенты динамичности при этом составят: для железобетонного ствола — 0,3; для стальной конструкции — 0,1.

При проектировании трубчатых башен обязательной является проверка их прочности на ветровой резонанс.

Расчет мачт

Нагрузки. При воздействии ветровой нагрузки мачта рассчитывается как многопролетный сжато-изогнутый стержень на нелинейноупругих опорах, образованных оттяжками. Ветровая нагрузка на ствол мачты определяется так же, как и для башни, при этом участки разбиения принимаются равными длине пролетов.

Период собственных колебаний на начальной стадии расчета определяется так же, как и для башни, по формуле (1.6). Форма колебаний мачты близка к полуволне синусоиды, что дает возможность при поверочном расчете определить период собственных колебаний мачты как однородной балки, считая верхнюю опору шарнирно-неподвижной:

$$T_{01} = 2 \sqrt{\frac{\bar{m}}{\frac{\pi E I_x}{H^4} + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_i}{H}}}, \quad (1.7)$$

где $\bar{m}$ — осредненная погонная масса, включающая оборудование; E и I_x — модуль упругости и осевой момент инерции сечения ствола соответственно; v_i — жесткость i -й опоры.

Логарифмический декремент колебаний мачты в целом определяется по формуле

$$\delta_m = \delta_c + \delta_b \frac{m_b}{M_c},$$

где $\delta_c = 0,1$ и $\delta_b = 0,15$ — логарифмические декременты колебаний ствола и оттяжек соответственно; m_b и M_c — массы оттяжек и ствола соответственно.

Ветровая нагрузка на оттяжку принимается постоянной по всей длине и равной нагрузке на отметке $2/3$ высоты крепления оттяжек к мачте. Коэффициент динамичности оттяжек принимается равным единице, т.е. учитывается только статическая составляющая скоростного напора ветра.

Расчет мачты состоит из предварительного и основного этапов. На предварительном этапе расчета задаются схемой, параметрами сечений основных элементов ствола, параметрами оттяжек (углы наклона, площадь сечения), а также их начальным натяжением. Затем определяются опорные реакции. При этом ствол рассматривается как неразрезная балка на жестких опорах или ряд однопролетных стержней, соединенных шарнирами в опорных сечениях (рис. 1.22).

Узловая нагрузка на i -й ярус (рис. 1.23) определяется с учетом ветровой нагрузки на оттяжки:

$$R_i = 0,5(w_i H_i + w_{i+1} H_{i+1}) + \sum_1^k Q_{bij},$$

где Q_{bij} — ветровая нагрузка на j -ю оттяжку i -го яруса; w_i — ветровая нагрузка на i -й пролет ствола; H_i — длина i -го пролета ствола, т.е. расстояние между двумя соседними ярусами оттяжек.

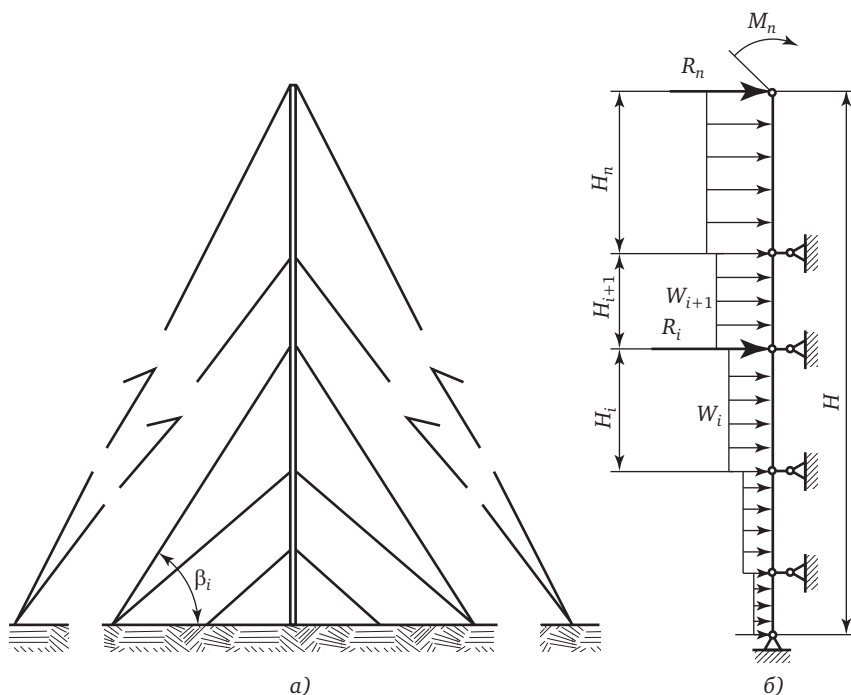


Рис. 1.22. Мачта (а) и схема нагрузок (б)

После определения узловых нагрузок проводится расчет оттяжек каждого яруса для определения жесткости опор и проверки прочности канатов. При этом для i -го яруса, образованного k канатами, сходящимися в одном узле (см. рис. 23, а), используется k уравнений равновесия оттяжек и два уравнения сил, действующих на узел.

Уравнение равновесия j -й оттяжки i -го яруса записывается в виде

$$\sigma_{ij} - \frac{A_{ij}}{\sigma_{ij}^2} = B_{0i} + \frac{\Delta L_{ij}}{L_i} E_b,$$

где

$$A_{ij} = \frac{p_{ij}^2 L_i^2 E_b}{24}; \quad B_{0i} = \sigma_{0i} - \frac{p_{0i}^2 L_i^2 E_b}{24 \sigma_0^2} - \alpha E_b (t - t_0);$$

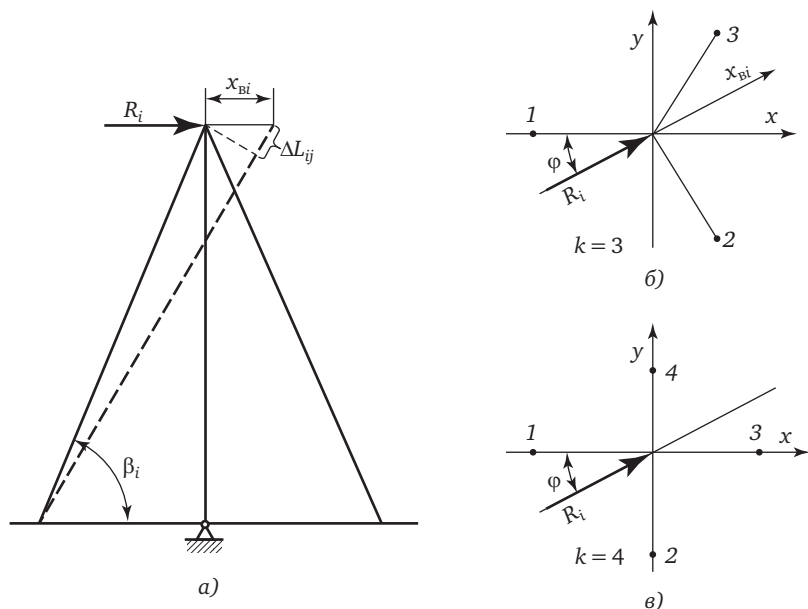


Рис. 1.23. Расчетная схема оттяжек i -го яруса мачты (а) с тремя (б) и четырьмя (в) оттяжками соответственно (1—4 — номера оттяжек)

B_{0i} — параметр, характеризующий исходное состояние и температурную деформацию оттяжек i -го яруса; σ_{ij} — напряжение в j -й оттяжке i -го яруса; p_{ij} — погонная нагрузка j -й оттяжки, отнесенная к единице ее площади сечения; L_i — длина оттяжки, одинаковая для всех оттяжек в ярусе; ΔL_{ij} — приращение длины пролета j -й оттяжки в результате смещения i -го яруса; α — коэффициент линейного удлинения; E_B — модуль упругости оттяжек; t — температура.

Таким образом, получаем систему уравнений для i -го яруса:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{i1} - \frac{A_{i1}}{\sigma_{i1}^2} &= B_{0i} + \frac{\Delta L_{i1}}{L_i} E_B; \\ \sigma_{ij} - \frac{A_{ij}}{\sigma_{ij}^2} &= B_{0i} + \frac{\Delta L_{ij}}{L_i} E_B. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

В случае применения трех оттяжек в ярусе ($k = 3$) система уравнений имеет вид:

$$R_i \cos \varphi - [\sigma_{i1} - 0,5(\sigma_{i2} + \sigma_{i3})] F_B \cos \beta_i = 0;$$

$$R_i \sin \varphi - (\sigma_{i2} - \sigma_{i3}) F_B \cos \beta_i \cos 30^\circ = 0.$$

В случае применения четырех оттяжек ($k = 4$):

$$R_i \cos \varphi - (\sigma_{i1} - \sigma_{i3}) F_B \cos \beta_i = 0;$$

$$R_i \sin \varphi - (\sigma_{i2} - \sigma_{i4}) F_B \cos \beta_i = 0,$$

где φ — угол между направлением узловой нагрузки (направлением ветра) и наветренной оттяжкой, имеющей индекс «1»; F_B — площадь сечения оттяжки.

В системе уравнений (1.8) неизвестными являются напряжения σ_{ij} , а также направление и величина перемещения оттяжного узла x_{Bi} . Решая систему уравнений относительно σ_{i1} , получим напряжение в наиболее нагруженной — наветренной оттяжке:

$$\sigma_{i1} = \sigma_{Ri} \cos \varphi \pm \sqrt{\frac{A_{13}}{k\sigma_{i1} - B_{0i} + (k-1)\sigma_{Ri} \cos \varphi - A_{0i}/\sigma_1^2}},$$

где $\sigma_{Ri} = R_i/F_{Bi}$ — узловая нагрузка, выраженная через напряжение в оттяжке.

Смещение оттяжного узла при условии совпадения его с направлением узловой нагрузки составит

$$x_{Bi} = \frac{L_i}{E_B \cos \varphi \cos \beta_i} \left(\sigma_{i1} - \frac{A_{i1}}{\sigma_{i1}^2} - B_{01} \right).$$

Коэффициент жесткости опоры определяется по формуле

$$v_i = R_{ii}/x_{Bi}$$

(считается постоянным в пределах эксплуатационных изменений напряжения в оттяжках).

Зависимость коэффициента жесткости опоры v_i от значения предварительного напряжения в оттяжках σ_{0i} показана на рис. 1.24. Начальное значение σ_{0i} должно удовлетворять неравенству

$$\left| \frac{\Delta v_i}{\Delta \sigma_{0i}} \right| \leq \frac{v_i}{\sigma_{0i}}.$$

Для выбора оптимального значения начального напряжения проводится расчет для нескольких значений σ_{0i} , затем уточняется период собственных колебаний по формуле (1.7) и величина ветровой нагрузки, после чего можно переходить ко второму, основному этапу расчета.

На основном этапе расчета ствола мачты за основную систему принимают балку, разделенную в местах опор шарнирами. В расчетной схеме (рис.1.25) неизвестными являются опорные моменты M_i и смещения упругих опор x_i .

В силу конструктивных особенностей ствола оттяжки крепят не на оси ствола мачты, а к поясам ствола, что обуславливает возникновение момента от эксцентриситета. Это приводит к уменьшению опорного момента и повышает общую устойчивость мачты, так как противодействует искривлению ствола.

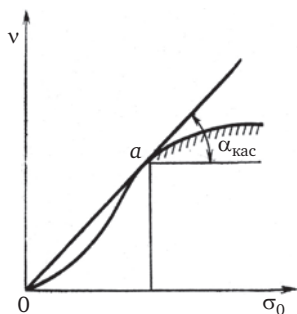


Рис. 1.24. Зависимость жесткости узла оттяжек от начального напряжения

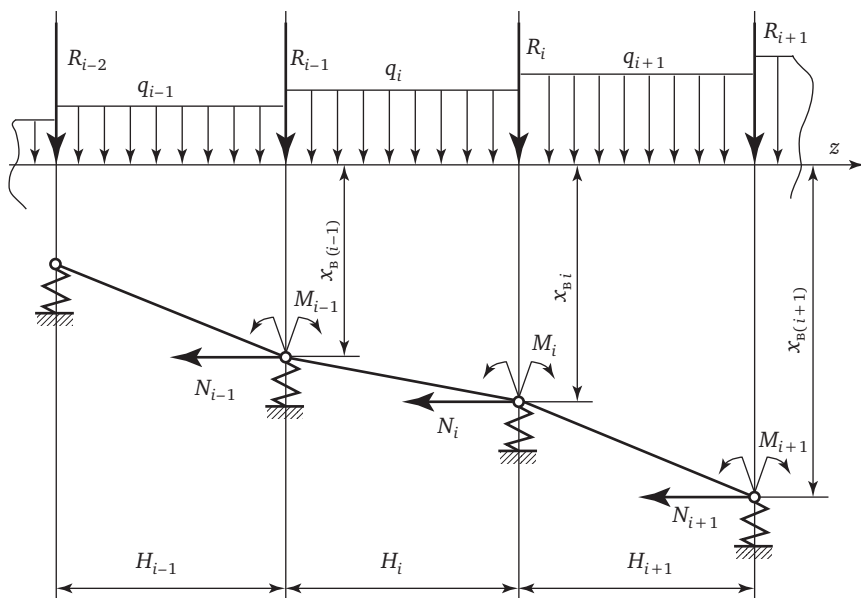


Рис. 1.25. Схема для расчета ствола мачты

Продольная сила по пролетам будет равна:

$$N_i = N_{i+1} + \sum_1^k \sigma_{ij} F_B \sin \beta_1 + k g_i L_i + 0,5 g_{ci} H_i,$$

где N_{i+1} — продольная сила в $(i+1)$ -м пролете ствола; g_i — погонная масса i -й оттяжки; g_{ci} — погонная масса i -го пролета ствола.

Для определения неизвестных для каждой опоры составляют уравнение равновесия сил на опоре и уравнение неразрывности деформаций.

Уравнение равновесия сил определяется суммой реактивных сил на опоре, которая равна узловой нагрузке R_i :

$$\frac{M_i - M_{i-1}}{H_i} - \frac{M_{i+1} - M_i}{H_{i+1}} - N_i \frac{x_{Bi} - x_{B(i-1)}}{H_i} + N_{i+1} \frac{x_{Bi} - x_{B(i-1)}}{H_i} + v_i x_{Bi} = R_i, \quad (1.9)$$

где $(M_i - M_{i-1})/H_i$ — нагрузка на i -ю опору от моментов, действующих на пролете H_i ; $(M_{i+1} - M_i)/H_{i+1}$ — нагрузка на i -ю опору от моментов, действующих на пролете H_{i+1} ; $N_i(x_{Bi} - x_{B(i-1)})/H_i$ и $N_{i+1}(x_{B(i+1)} - x_{Bi})/H_i$ — нагрузка на i -ю опору соответственно от сил N_i и N_{i+1} , возникающих при смещении опор; v_i, x_{Bi} — жесткость и смещение опор соответственно.

Уравнение неразрывности деформаций для i -й опоры имеет вид

$$\theta_{i\text{лев}} = \theta_{i\text{прав}}, \quad (1.10)$$

где $\theta_{i\text{лев}} = dx/dz_i|_{z_i=H_i}$ — угол поворота сечения слева от i -го шарнира, определяемый формой упругой линии i -го пролета; $\theta_{i\text{прав}} = dx/dz_{i+1}|_{z_{i+1}=0}$ — угол поворота сечения справа от i -го шарнира, определяемый формой упругой линии $(i+1)$ -го пролета.

Дифференциальное уравнение упругой линии i -го пролета записывается как

$$EI_{xi} \frac{d^2 x}{dz^2} = - \left[M_{i-1} + \frac{M_i - M_{i-1}}{H_i} z_i + \frac{w_i H_i}{2} z_i - \frac{w_i z_i^2}{2} + N_i (x - x_{B(i-1)}) \right]. \quad (1.11)$$

Решение этого неоднородного дифференциального уравнения имеет вид

$$x = A_i \sin(\alpha_i z_i) + B_i \cos(\alpha_i z_i) - \frac{1}{N_i} \left(M_{i-1} + \frac{M_i - M_{i-1}}{H_i} z_i + \frac{w_i H_i}{2} z_i - \frac{w_i z_i^2}{2} + \frac{w_i}{\alpha_i^2} - x_{B(i-1)} N_i \right), \quad (1.12)$$

где

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{N_i}{E_c I_{xi}}};$$

A_i и B_i — постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий: при $z = 0$ $x = x_{B(i-1)}$; при $z = H_i$ $x = x_{Bi}$; E_c — модуль упругости ствола.

Решение для $(i+1)$ -го пролета может быть получено простой заменой индекса i в уравнении (1.12) на индекс $(i+1)$.

Подставив полученные зависимости в уравнение (1.10), условие неразрывности для i -й опоры примет вид

$$a_i M_i + (b_i + b_{i+1}) M_i + a_{i+1} M_{i+1} + 6 \left(\frac{x_{B(i+1)} - x_{Bi}}{H_{i+1}} - \frac{x_{Bi} - x_{B(i-1)}}{H_i} \right) = -c_i \frac{w_i H_i^2}{4} - c_{i+1} \frac{w_{i+1} H_{i+1}^2}{4}, \quad (1.13)$$

где

$$a_i = \frac{6}{N_i H_i} \left[\frac{\alpha_i H_i}{\sin(\alpha_i H_i)} - 1 \right];$$

$$b_i = \frac{6}{N_i H_i} [1 - \alpha_i H_i \operatorname{ctg}(\alpha_i H_i)];$$

$$c_i = \frac{6}{N_i H_i} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_i H_i}{2} - \frac{\alpha_i H_i}{2} \right);$$

a , b , c — коэффициенты, учитывающие влияние продольной сжимающей силы и характеризуют меру неустойчивости пролета.

Таким образом, значения опорных моментов и смещений определяются из системы $(2n-1)$ уравнений (1.9) и (1.13).

Если результаты расчетов смещения опор мало отличаются от найденных на предварительном этапе, то расчет мачты считается законченным, в противном случае его повторяют, задаваясь вновь полученными значениями жесткостей.

Далее проводится расчет мачты и ее элементов на прочность по обычной методике и устойчивость отдельных стержней ферменного ствола. Трубчатые и сплошностенчатые стволы проверяют на местную потерю устойчивости.

Расчет мачты на устойчивость. Потеря устойчивости мачты может быть связана с недостаточной жесткостью ствола или опор.

Если по результатам расчета установлено, что условие устойчивости какого-либо пролета не обеспечивается, следует увеличить жесткость сечения ствола за счет увеличения его размеров.

Недостаточная жесткость опор приводит к общей потере устойчивости мачты. Например, при воздействии ветра по направлению к одной из трех оттяжек в двух других (подветренных) оттяжках мачты напряжение может понизиться почти до нуля. При этом жесткость опоры поперек действия ветровой нагрузки уменьшается настолько, что мачта теряет устойчивость в указанном направлении.

При составлении уравнения равновесия i -го узла из (1.9) получаем то же выражение, но без грузовых членов:

$$v x_{Bi} - N_i \frac{x_{Bi} - x_{B(i-1)}}{H_i} + N_{i+1} \frac{x_{Bi+1} - x_{Bi}}{H_i} = 0.$$

Неизвестными в этом уравнении являются величины смещения x_{Bi} . Введя обозначение $\lambda S_i = N_i / H_i$ (λ — коэффициент, характеризующий запас устойчивости), получим для i -го узла

$$\lambda S_i x_{i-1} - (\lambda S_i + \lambda S_{i+1} - v_i) x_i + \lambda S_{i+1} x_{i+1} = 0.$$

Составив данное уравнение для каждого узла, получаем систему линейных уравнений, имеющую ненулевое решение в том случае, когда определитель системы равен нулю. Общая устойчивость мачты находится как наименьший корень λ определителя системы.

Если коэффициент запаса устойчивости представить в виде $\lambda = \eta \varepsilon$, где η — коэффициент увеличения продольных сил, ε — ко-

эффицент уменьшения жесткости опор, то устойчивость мачты можно определить при различных комбинациях η и ε и выбрать оптимальное решение.

Если жесткость опор определена с учетом снижения предварительного натяжения канатов, то считается допустимой величина коэффициента устойчивости, равная не менее 1,5.

Особый случай расчета опор

Жесткость оттяжных узлов зависит от направления ветровой нагрузки. На рис. 1.26 показано смещение опоры с тремя оттяжками в плане. При направлении ветра 1 смещение узла наибольшее, при направлении 2 — наименьшее, поэтому жесткость опоры при направлении ветра 1 минимальна, а при направлении 2 — максимальна. Следовательно, смещение опор происходит в направлении большей податливости, и поэтому, как правило, не совпадает с направлением ветра.

Чтобы избежать потери устойчивости, при расчете оттяжных узлов следует подбирать необходимую величину натяжения оттяжек. Обычно отношение между минимальным и максимальным натяжением принимается равным 0,8.

Если на вершине мачты антенны размещены так, что центр давления ветра на них смещен относительно оси мачты (рис. 1.27), то кроме изгибающего возникает крутящий момент, соизмеримый с изгибающим. В этом случае дополнительно вводится специальный — крутильный ярус оттяжек.

На рис. 1.28 приведена схема расчета башни на кручение. т.е. схема рассматривается как плоская задача.

Крутящий момент от сил T_1 и T_2 :

$$M_{кр} = T_1 a_1 + T_2 a_2;$$

$$M_{кр} = T_1 b_1 + T_2 b_2.$$

Следовательно,

$$T_1 = \frac{M_{кр}}{b_1 \left(1 + \frac{a_1 b_2}{a_2 b_1} \right)};$$

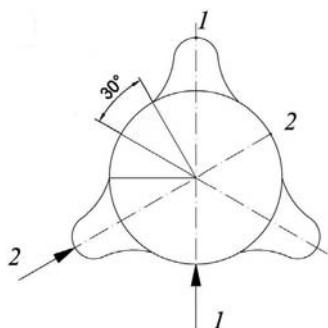


Рис. 1. 26. Диаграмма смещения оттяжного узла опоры:
1, 2 — направление ветра

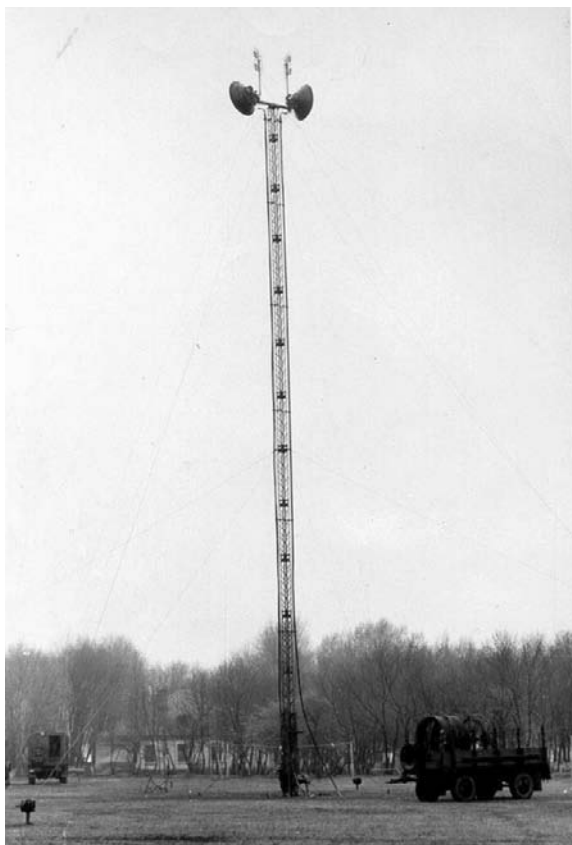


Рис. 1.27. Мачта с двумя антеннами на вершине

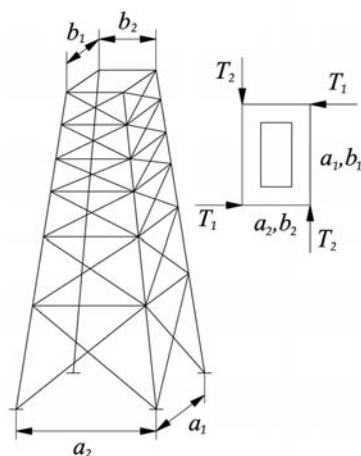


Рис. 1.28. Схема расчета башни на кручение

$$T_2 = \frac{M_{\text{кр}}}{b_2 \left(1 + \frac{a_2 b_1}{a_1 b_2} \right)}.$$

Таким образом, силы T_1 и T_2 определяются на предварительной стадии и служат для оценочного расчета башни на кручение.

Конструкции апертурных антенн

Апертурные антенны — это антенны, у которых излучение (или прием) электромагнитной энергии осуществляется через некоторую воображаемую поверхность (апертуру) антенны, которая представляет собой плоскость, размеры которой значительно больше длины волны.

Типы апертурных антенн: зеркальные (рефлекторные) — оптического типа; линзовые — оптического типа; рупорные — волноводного типа и др.

Основные функциональные составляющие апертурных антенн: облучатели и их силовые конструкции; токонесущие части и их силовые конструкции; опорно-поворотные конструкции.

Апертурные антенны состоят из первичного слабонаправленного источника излучения — облучателя и системы, формирующей основную диаграмму направленности (ДН). Ширина ДН — это угол между двумя направлениями, в пределах которых амплитуда напряженности электромагнитного поля составляет не менее 0,5 от максимальной плотности мощности. Ширина диаграммы направленности $\theta_{0,5}$ по нормали к апертуре в какой-либо плоскости определяется зависимостью:

$$2\theta_{0,5} = A\lambda/D,$$

где D — поперечный размер апертуры антенны в этой плоскости; λ — длина волны; A — коэффициент (если $\theta_{0,5}$ измеряется в градусах, то $A = 51$).

Коэффициент направленного действия (КНД) количественно характеризует направленные свойства антенны по сравнению с всеправленной и показывает, во сколько раз мощность сигнала, из-

лучаемого антенной, больше мощности всенаправленной и зависит от ширины диаграммы направленности. КНД в направлении максимального излучения определяется зависимостью

$$D_0 = \frac{4\pi F\nu}{\lambda^2},$$

где F — площадь апертуры; ν — коэффициент использования поверхности (КИП), равный отношению эффективной площади к площади апертуры.

Апертурные антенны позволяют получить самые узкие диаграммы направленности и максимальный КНД, что обуславливает их широкое применение в системах радиолокации, радиорелейных линий связи, космической связи, радиоастрономии и др.

Отличительными особенностями апертурных антенн являются необходимость в высокой точности их изготовления и соблюдении жестких требований к их эксплуатации.

2.1. Конструкции зеркальных (рефлекторных) антенн

Рефлекторными антеннами называют антенны, формирующие ДН путем отражения электромагнитных волн от металлического рефлектора (зеркала) определенного профиля. Зеркало (одно или несколько) и облучатель являются основными элементами таких антенн.

Зеркальные антенны применяют в современных радиосистемах в диапазоне волн от миллиметровых до метровых. Это обусловлено простотой их конструкции, возможностью формирования различных ДН (шириной до единиц угловых минут), а также малой шумовой температурой.

По функциональному назначению зеркальные антенные устройства состоят из отражающего полотна (рефлектора), облучателя, несущих конструкций (силовой каркас рефлектора и узлы крепления облучателя) и опорно-поворотного устройства.

Широкоугольное сканирование зеркальных антенн осуществляется исключительно механическим поворотом всей антенны, поэтому скорость сканирования не может быть большой. В то же время в небольшом секторе углов возможно сканирование электро-механически — путем вынесения облучателя из фокуса в фокаль-

ной плоскости. В этом случае скорость отклонения ДН существенно возрастает. Однако отклонение луча возможно на угол, не превышающий две-три ширины ДН на уровне половинной мощности (большее увеличение угла сильно искажает ДН антенны и уменьшает КНД).

Существует множество типов зеркальных антенн: с параболическими, сферическими, плоскими, угловыми зеркалами, зеркалами специального профиля. Наибольшее распространение имеют однозеркальные параболические антенны (ОЗА), представляющие собой металлическое зеркало параболического профиля, в фокусе которого помещен облучатель. Зеркало может выполняться в виде осесимметричной вырезки из параболоида вращения овальной формы или в виде параболического цилиндра.

Современные технологии позволяют производить зеркала диаметром не более 3 м. Их изготавливают из листового проката сплавов на основе алюминия и антимагнитной стали. Зеркала большего размера являются сборными из отдельных секций, что требует крепежной арматуры и их специального монтажа. Точные зеркала малых размеров производят из пластмассы с последующей металлизацией их поверхности.

К недостаткам однозеркальных антенн можно отнести сложность вывода высокочастотной энергии к облучателю, относительно большие продольные размеры (фокусное расстояние сравнимо с диаметром зеркала) и ограниченный сектор сканирования при смещении облучателя из фокуса в фокальной плоскости. Длинный фидерный тракт и система крепления облучателя увеличивают массу антенны, затенение раскрыва и рассеяние энергии, а при использовании сложных облучателей (моноимпульсные и сканирующие) это проявляется значительно. Обеспечение необходимых технических параметров ограничено возможностью изменения соотношения диаметра зеркала к фокусному расстоянию, а также сохранением заданных пределов ДН облучателя для требуемых размеров антенны.

Этих недостатков практически лишены многозеркальные антенны. Рассмотрим простейшие из них — двухзеркальные, антенны Кассегрена (АК) и Грегори (АГ).

Двухзеркальная антенна (ДЗА) состоит из большого зеркала, малого зеркала и облучателя (рис. 2.1). Большое зеркало является па-

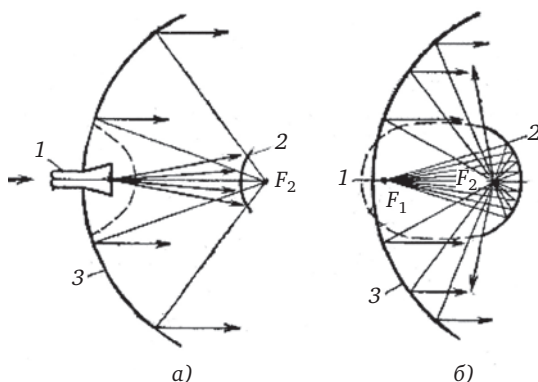


Рис. 2.1. Двухзеркальные антенны:
 а — система Кассегрена; б — система Грегори; 1 — облучатель;
 2 — малое зеркало; 3 — большое зеркало

раболоидом вращения или вырезки из него. Малое зеркало может быть частью двухполостного гиперboloида вращения (в системе Кассегрена) или частью эллипсоида (в системе Грегори).

Принцип действия двухзеркальной системы Кассегрена основан на следующем известном свойстве гиперболического зеркала: если в одном из фокусов F_1 двухполостного гиперboloида вращения поместить точечный источник, то отраженные от поверхности второй полости гиперboloида лучи образуют расходящийся пучок с центром во втором фокусе F_2 (см. рис. 2.1, а).

Таким образом, для нормальной работы двухзеркальной антенны необходимо в одном из фокусов малого гиперболического зеркала (F_1) поместить фазовый центр облучателя, а второй фокус (F_2) совместить с фокусом параболического зеркала. В этом случае большое зеркало будет облучаться так, как если бы некоторый фиктивный облучатель находился в его фокусе. При этом следует учитывать, что ДН реального и фиктивного облучателей будут неодинаковыми.

Двухзеркальная система Грегори отличается от системы Кассегрена лишь тем, что вспомогательное зеркало является вырезкой из эллипсоида вращения (рис. 2.1, б). Последний обладает тем свойством, что если в один из его фокусов F_1 поместить сосредоточенный источник, то отраженные от внутренней поверхности лучи соберутся в его втором фокусе F_2 . Следовательно, если фазо-

вый центр облучателя поместить в один из фокусов эллипсоида F_1 , а второй фокус F_2 совместить с фокусом параболического зеркала, то система будет работать аналогично предыдущей. Более распространенными являются антенны Кассегрена.

Двухзеркальные антенны обычно имеют меньшие продольные размеры по сравнению с однозеркальными, позволяют более точно реализовать необходимые параметры, поскольку можно управлять размерами и формой большего количества элементов (два зеркала, облучатели и расстояние между ними). Облучатель двухзеркальных антенн можно размещать непосредственно у вершины основного зеркала, что упрощает конструкцию антенны (особенно если облучатель сложный) и укорачивает длину фидера. За счет этого снижается масса антенны, возрастает ее КПД и снижается шумовая температура.

Возможности двухзеркальных простых и апланатических систем по сканированию путем перемещения отдельных элементов системы тоже выше, чем у обычных ОЗА. ДЗА имеют дополнительные возможности широкоугольного сканирования, уменьшения затенения раскрыва с помощью малых зеркал и больших зеркал с поворотом плоскости поляризации. В несимметричных ДЗА затенение целиком устраняется, поэтому они применяются в многоканальных и многофункциональных системах.

Преимущества ДЗА по сравнению с ОЗА:

- меньшие продольные размеры;
- меньшая длина фидерного тракта (позволяет увеличить отношение «сигнал/шум»);
- меньшая шумовая температура (рассеянная часть энергии облучателя направлена в переднюю малозаполненную полусферу);
- возможность качания луча без использования высокочастотного вращающегося сочленения для вращения малого зеркала;
- большее количество степеней свободы и облегчение синтеза ДН;
- возможность существенно увеличить КПД.

Основное зеркало антенны Кассегрена представляет собой симметрично усеченный параболоид вращения (ПВ) с фокусом, расположенным в точке F_2 , и фокусным расстоянием f_6 (рис. 2.2). Секущая плоскость Q (плоскость раскрыва) перпендикулярна фокальной оси параболоида $F_1 F_2$, которая является осью симметрии антенны.

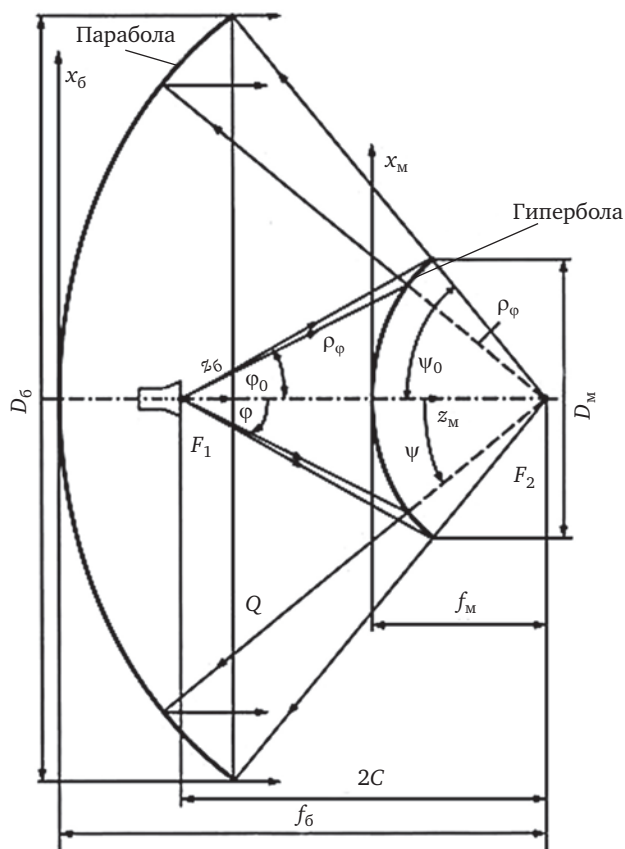


Рис. 2.2. Схема антенны Кассегрена:

ψ — $1/2$ предельного угла раскрыва; f_b и f_m — фокусные расстояния

Вспомогательное зеркало (рис. 2.3) — симметрично усеченный гиперboloид вращения, софокусный параболоиду в точке F_2 . Фокальные оси гиперboloида и параболоида совпадают. Второй фокус гиперboloида F_1 находится на оси симметрии и обычно расположен вблизи вершины параболоида. На рис. 2.3 показано взаимное расположение параболы и ветвей гиперболы. Гиперboloид является двухполостной поверхностью, симметричной как относительно фокальной оси, так и относительно плоскости, проведенной перпендикулярно оси симметрии через середину расстояния между фокусами $F_1 F_2$ (сечение двухполостного гиперboloида плоскостью

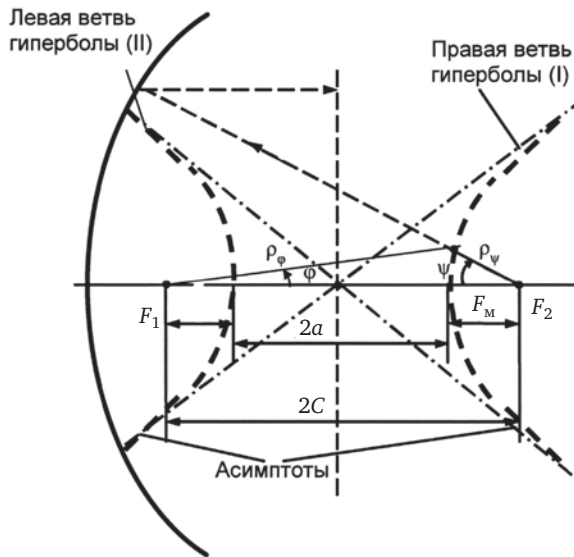


Рис.2.3. Схема построения вспомогательного зеркала (контррефлектора)

показано на рис. 2.3 (штриховыми линиями). В качестве образующей кривой малого зеркала обычно используется правая ветвь гиперболы (I), поскольку система с вогнутым зеркалом — левая ветвь гиперболы (II) — способна работать лишь с длиннофокусными параболоидами, что конструктивно неудобно в исполнении.

Разность расстояний от фокусов до произвольной точки на поверхности гиперболы постоянна, т.е. $\rho_\phi - \rho_\psi = 2a$, где $2a$ — расстояние между его вершинами (см. рис. 2.3). Расстояние между фокусами гиперболоида $2C = 2a + 2f_m$. Эксцентриситет образующей гиперболы $e = C/a > 1$.

В антенне Кассегрена фазовый центр источника облучения совмещается с фокусом гиперболоида F_1 (см. рис. 2.2). Вследствие свойства отражения от поверхностей второго порядка волна, создаваемая источником, после отражения от поверхности гиперболоида снова оказывается сферической с мнимым фазовым центром F_2 . Поскольку этот центр совмещен с фокусом параболоида, то дальнейший ход лучей в антенне оказывается таким же, как и в обычной однозеркальной антенне с параболоидом вращения, облучаемым из фокуса. Следовательно, в плоскости раскрыва ДЗА образуется плоский волновой фронт.

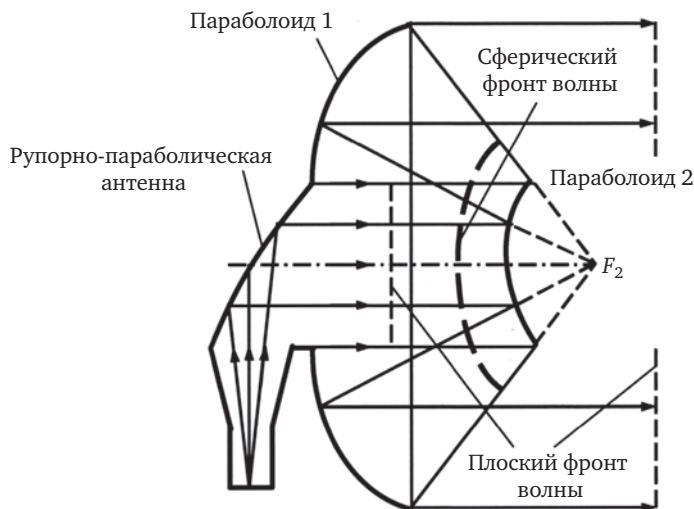


Рис. 2.4. Антенна с рупорно-параболическим облучателем

Схема двухзеркальной рупорно-параболической антенны показана на рис. 2.4. При удалении второго фокуса гиперболы F_1 в бесконечность гиперboloид трансформируется в параболоид 2 ($e = 1$) с фокусом в точке F_2 . Параболоид 2 облучается плоской волной, распространяющейся вдоль фокальной оси. Вследствие этого отраженная волна оказывается сферической с мнимым фокусом в точке F_2 .

Полотно антенны выполняют из коррозионно-стойкой стали с антимагнитными свойствами или из алюминиевых сплавов. Зеркала малых размеров изготавливают из листового материала (оболочка параболической формы одновременно выполняет роль силового каркаса).

Чтобы уменьшить ветровую нагрузку на зеркало, для антенн малых размеров применяют обтекатели. Однако обтекатели увеличивают массу антенны и ухудшают точность отражающей поверхности.

Для снижения ветровой нагрузки зеркала антенн больших размеров выполняют не сплошными, а перфорированными: из сетки, решетки или набора параллельных пластин, закрепленных на силовом каркасе.

Часть энергии облучателя перфорированных антенн просачивается за зеркало. Качество такого зеркала оценивается

коэффициентом прохождения, равным отношению мощности, просочившейся за зеркало, к мощности падающей на него. Обычно коэффициент прохождения принимается равным 1%. Для достижения этой величины коэффициента диаметр перфорации должен быть менее $0,3\lambda$, а расстояние между отверстиями — не менее $0,5\lambda$. Общая площадь, занимаемая отверстиями, не должна превышать половины площади зеркала. Следовательно, перфорированием не достигается существенного выигрыша. Перфорированные антенны нечувствительны к поляризации. При линейной поляризации зеркало можно изготавливать из пластин, параллельных вектору электрического поля. Расстояние между пластинами должно быть не более $0,2\lambda$.

Рефлектор может быть выполнен двумя способами.

1. Токонесущая поверхность рефлектора изготавливается вместе с каркасом и является силовым элементом конструкции.

2. Силовой каркас и токонесущая поверхность выполняются отдельно, а затем соединяются регулируемыми компенсаторами.

При использовании первого способа получается более легкая конструкция, второго — достигается более высокая точность изготовления рабочей поверхности рефлектора. Форма контура зеркала обуславливает выбор вида облучателя. При симметричной вырезке формы контура облучатель должен быть точечным, при параболическом цилиндре — линейным, а при овальной форме контура облучатель должен создавать веерную диаграмму направленности. От вида облучателя зависит максимальная мощность и КНД антенны.

Облучатель расположен в поле, отраженном от зеркала, и поэтому принимает часть отраженной энергии, что ухудшает его согласование с трактом питания, особенно при работе антенны в широком диапазоне частот. Для уменьшения такого влияния зеркала на облучатель применяют зеркала с поворотом плоскости поляризации электромагнитного поля на 90° и несимметричные зеркала (облучатель вынесен из отраженного поля зеркала).

Среди существующих антенн наименьшим боковым излучением (наилучшей помехозащищенностью) обладают рупорно-параболические антенны (РПА). Рупорно-параболическая антенна (рис. 2.5) состоит из питаемого волноводом пирамидального или конического рупора и непосредственно присоединенного к нему зеркала,

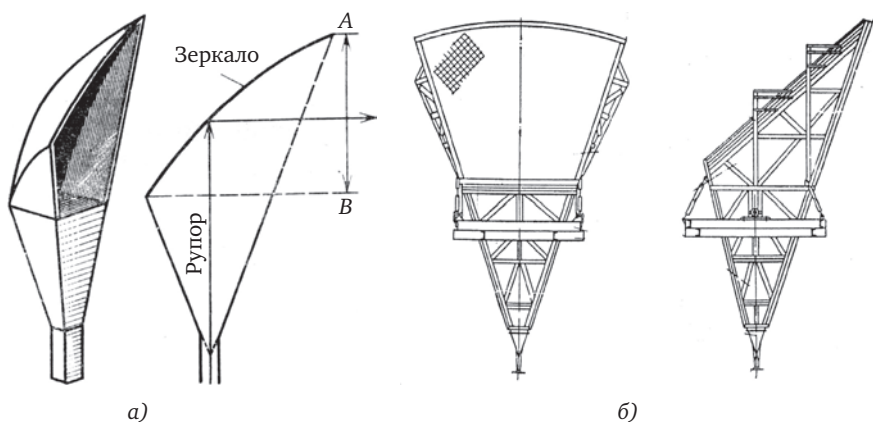


Рис. 2.5. Рупорно-параболическая антенна

являющегося частью параболоида вращения (рис. 2.5, а). Фокус параболоида совпадает с фазовым центром рупора, находящимся у его вершины. Электромагнитные волны, исходя из рупора, отражаются от параболического зеркала (рис. 2.5, б). Фронт отраженной от зеркала волны близок к плоскому, и поверхность раскрыва зеркала (поверхность AB) является синфазной. В такой системе электромагнитная энергия облучателя не может пройти мимо зеркала, что резко уменьшает задние лепестки ДН.

Облучатель (рупор) не затеняет поверхность зеркала, что также приводит к уменьшению боковых лепестков. Так как отраженная от зеркала энергия не попадает в рупор, то отсутствует реакция зеркала на облучатель. Уровень боковых лепестков РПА в 2—3 раза ниже, чем у других типов зеркальных антенн. Однако из-за больших габаритов и массы их применяют на наиболее важных магистральных линиях связи, где требуется большая степень изоляции приемного и передающего каналов.

В качестве облучателей зеркальных антенн используется широкий класс слабонаправленных антенн. Для изготовления облучателей используют латунь, алюминиевые сплавы, композиционные материалы с металлизацией токонесущих поверхностей.

Крепление облучателя к силовому каркасу рефлектора осуществляется с помощью тяг, основным требованием к которым является минимальное затенение раскрыва рефлектора при обеспечении необходимой устойчивости и жесткости. Для обеспечения положе-

ния фазового центра облучателя в фокусе зеркала тяги делают регулируемыми по длине. Крепление тяг к каркасу рефлектора и облучателю осуществляют посредством шарниров. Конструкция тяг может быть трубчатая или ферменная. Для изготовления тяг применяют алюминиевые сплавы, сталь, композиты.

Расчет точности изготовления рефлектора

Точность изготовления профиля рефлектора (зеркала) обусловлена фазовой ошибкой в апертуре. Отклонение профиля от заданного не должно превышать $\Delta r \leq \lambda/8 (1 + \cos \psi)$ при фазовой ошибке меньше $\pi/4$, которая вызывает и определяет искажение диаграммы направленности антенны и снижение КНД.

Относительная точность изготовления зеркал определяется зависимостью $\Delta r/2R = 10^{-n}$, где $n = 3 \dots 5$. Коэффициент n определяется требуемой точностью. При $n = 5$ обеспечивается высокая точность изготовления. Максимальный КНД при заданной точности изготовления зеркала

$$D = [1 - 16\pi^2(2R/\lambda)^2 10^{-2n}] [\pi 2R/\lambda].$$

Так, при $n = 4$ КНД изменяется до $2R/\lambda < 570$, а при увеличении диаметра рефлектора КНД уменьшается из-за искажения профиля.

Если считать, что искажения профиля не коррелированы и имеют нормальный закон распределения (рассеяны по площади рефлектора равномерно), то снижение КНД составит:

$$D/D_0 = \exp - (4\pi\Delta r/\lambda)^2,$$

где Δr — среднеквадратичное отклонение точности профиля от теоретического.

При проектировании антенн следует иметь в виду, что отклонение точности профиля имеет технологическую (неточность изготовления) и эксплуатационную (собственная масса, ветер, температура и др.) составляющие.

Несущие конструкции антенн

Основные требования, предъявляемые к несущим конструкциям антенн:

- обеспечение устойчивости к климатическим, гравитационным и другим внешним воздействиям;

- обеспечение требований жесткости, определяющих работоспособность антенны;
- обеспечение управляемости формой и положением элементов антенны при изготовлении, монтаже и эксплуатации;
- обеспечение конструктивных решений по удалению снега, гололеда и др.;
- обеспечение радиотехнических требований эффективного функционирования;
- обеспечение возможности модернизации.

Антенны диаметром 3...7 м обычно выполняют из листового материала, который делят на центральную часть диаметром D_0 и n периферийных лепестков. К контуру лепестков крепят уголки для придания каркасу жесткости. Уголки служат для соединения лепестков между собой и крепления к центральной части. Для увеличения жесткости конструкции применяют специальные радиальные ребра — стрингеры.

В антеннах диаметром 8...10 м отражающее полотно обычно одновременно играет роль силового каркаса. Отражающее полотно выполняют из листового материала, образующего заданную поверхность, к тыльной стороне которой, например клепкой или сваркой, присоединяют ребра жесткости из уголкового или другого профиля.

В антеннах больших диаметров отражающее полотно, как правило, выполняют из жестких щитов треугольной или трапециевидной формы. Щиты крепят к силовому каркасу в трех или четырех точках с помощью специальных устройств, обеспечивающих юстировку при монтаже. Форма антенны определяется не деформациями силового каркаса, а смещением точек крепления полотна.

Каркас зеркала диаметром до 25 м выполняют из пространственных блоков заводского изготовления. При диаметре зеркала более 25 м кроме пространственных блоков применяют плоские фермы и элементы. При диаметре зеркал более 45 м используют радиальные фермы (многопоясные). Верхние части ферм имеют большие габариты для перевозки по железной дороге, поэтому полностью изготавливаются на заводе. Нижняя часть ферм собирается на монтажной площадке.

Весовая нагрузка несущих конструкций имеет детерминированный характер, поэтому искажения формы отражающей поверхно-

сти антенны могут быть компенсированы соответствующей коррекцией положения облучателя.

Напряженно-деформированное состояние антенн малых диаметров определяется действующей на них ветровой нагрузкой. Весовая нагрузка таких антенн во много раз меньше ветровой, поэтому при расчетах не учитывается. Весовая и ветровая нагрузки антенн больших размеров имеют один порядок.

Для симметричных несущих каркасов под действием симметричных нагрузок деформации также симметричны. При действии кососимметричных сил сечения отражающей поверхности, перпендикулярные фокальной оси, остаются плоскими, но поворачиваются. Поэтому при круглом раскрыве зеркала наилучшим типом построения каркаса является полярно-симметричная циклическая стержневая система, позволяющая оперировать с симметричными и кососимметричными деформациями отдельно, что значительно упрощает задачу фокусной компенсации. Повторяемость отдельных элементов в циклических системах наибольшая, что повышает технологичность конструкций и удешевляет их производство.

Для компенсации влияния нагрузок используется метод гомологического построения силового каркаса. Перемещения узловых точек, образующих ложе элементов отражающей поверхности в результате деформирования конструкции при наклонах зеркала к горизонту под действием веса, приводят лишь к деформации исходной поверхности и трансформации ее в другую поверхность того же типа, т.е. гомологическую. Для компенсации деформаций необходимо задать соответствующий закон деформирования. Решается эта задача созданием принудительно-гомологических и естественно-гомологических систем. Принудительно-гомологические системы реализуются за счет автоматического регулирования длины группы ключевых стержней. Включение компенсаторов, изменяющих длину стержней, происходит при изменении угла наклона зеркала к горизонту (весовая компенсация) и при изменении усилия в стержне (ветровая нагрузка) или при изменении температуры (температурная компенсация). Естественно-гомологические системы создаются за счет соответствующего выбора конструктивной схемы и жесткости отдельных элементов, что обеспечивает управление локальной податливостью поверхностных узловых точек.

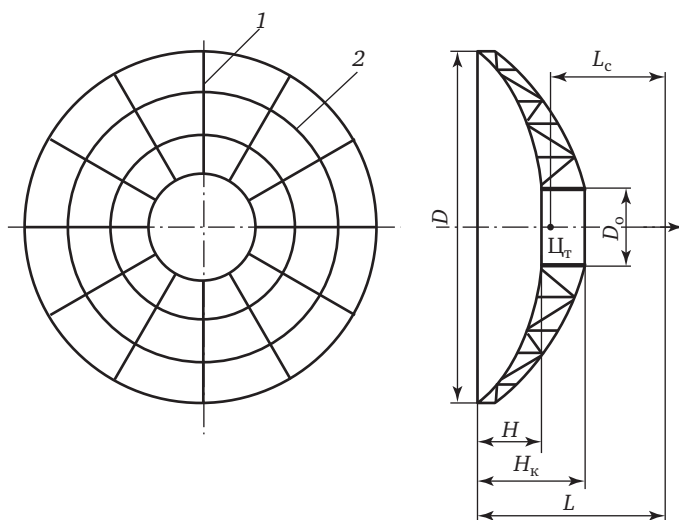


Рис. 2.6. Несущий каркас вращаемого зеркала:

1 — меридианальная ферма; 2 — кольцевой пояс; H — глубина зеркала; H_k — расстояние от плоскости раскрыва до задней кромки каркаса; D — диаметр зеркала; D_0 — диаметр кольца опирания; L — расстояние от плоскости раскрыва до угломерной оси; L_c — расстояние от плоскости раскрыва до центра тяжести $\Pi_{г}$

Наилучшим решением является разделение компенсации компонентов деформаций между автономными группами стержней, что обуславливает направленность влияния деформации конечных сечений стержней.

Автономными группами стержней являются: стержни радиальных ферм (для компенсации кососимметричных деформаций), кольцевые элементы и кольцевые пояса (для компенсации симметричных деформаций).

Несущие каркасы подавляющего большинства вращаемых зеркал представляют собой системы, состоящие из определенным образом размещенных плоских или квазиплоских элементов, жестких только в своей плоскости.

Несущий каркас имеет вид единой пространственной решетчатой конструкции, состоящей из меридиональных ферм и кольцевых поясов, развязанных системами связей и диафрагм (рис. 2.6). Шаг меридиональных ферм и кольцевых поясов обусловлен необходимостью создания сети узловых точек для опирания элементов

отражающей поверхности. Число меридиональных ферм круглых зеркал составляет 12...32.

При создании больших сверхточных антенн весьма важным является выбор схемы конструкции опирания, которая обеспечивает наименьшие дополнительные возмущения. Параметры, определяющие условия опирания (см. рис. 2.6):

- относительная высота каркаса характеризует его общую жесткость $\Delta H = H_k - H$;
- коэффициент заделки ξ — характеризует концентрацию усилий в зоне опирания $\xi = D_o/D$;
- относительный эксцентриситет ε , характеризующий степень компактности каркаса относительно угломестной оси вращения $\varepsilon = L_y - L_c$.

В зависимости от размеров зоны опирания все антенны с вращаемыми зеркалами с полярной структурой можно разделить на три типа.

1. Зеркала, имеющие опирание, близкое к наружному контуру, т.е. $\xi = 0,6 \dots 1,0$ (антенны с мостобашенной подвеской). При таком способе опирания возникают максимальные дополнительные искажения, но нет необходимости в весовой балансировке, и, следовательно, обеспечивается снижение нагрузки на механизмы.

2. Зеркала, имеющие среднюю зону опирания, т.е. $\xi = 0,3 \dots 0,5$ (с помощью опорной балки — рамы). При таком способе достигается уменьшение длины внешних радиальных ферм, заделываемых в кольцо, и уменьшение деформации краев зеркала.

3. Зеркала, закрепляемые в сравнительно небольшой зоне центральной части каркаса, т.е. $\xi = 0,2$ (антенны, имеющие систему башенной подвески). Внутри каркаса создается мощный центральный стакан, который передает усилия от каркаса к механизмам вращения. Деформации и опорные реакции регулируются изменением высоты каркаса и созданием локальных зон повышенной жесткости. С увеличением размера зеркала увеличиваются жесткость каркаса и нагрузка на механизмы.

Оптимальным является опирание каркаса по кругу диаметром, равным примерно 0,4 диаметра раскрыва ($\xi = 0,4$), на узлы, имеющие одинаковую податливость, при их расположении и числе, соответствующем расположению и числу меридиональных (радиальных) несущих ферм.

Для фокусной компенсации наилучшим способом опирания является такой, который по влиянию на напряженно-деформированное состояние каркаса соответствует закреплению каркаса на большом удалении от раскрыва. Ограничением является рост нагрузок на механизмы вращения, который пропорционален увеличению ΔH^* и ξ .

Схемы и типы соединения элементов ферменных конструкций

Несущие конструкции зеркальных антенн чаще всего выполняют в виде плоских или пространственных ферм. (Ферменные конструкции также широко используют для опор — башни, мачты и др.). Фермы состоят из отдельных стержней, воспринимающих продольные силы растяжения, сжатия и изгиба.

Растянутые стержни могут иметь одностенчатые (рис. 2.7, а—д) и двухстенчатые (рис. 2.7, е—з) сечения. Сечения, состоящие из одиночного равнобокого уголка, применяют для слабо нагруженных стержней. Такие сечения имеют незначительную жесткость, а расчетные сопротивления или допускаемые напряжения для этих стержней при расчетах снижаются на 25%. При расчете стержней из неравнобокого уголка (крепится более широкой полкой) величину допускаемых напряжений не снижают.

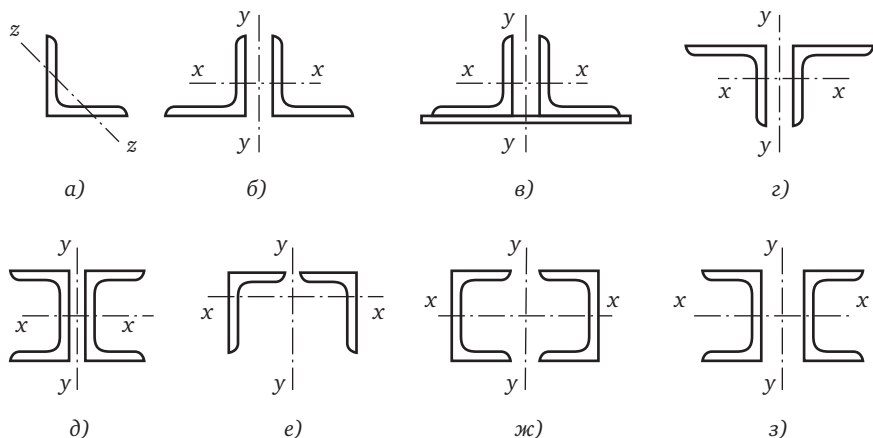


Рис. 2. 7. Типы сечений растянутых стержней:
а—д — одностенчатые; е—з — двухстенчатые

Тавровые сечения, состоящие из двух равнобоких или неравнобоких уголков (рис. 2.7, б—г), применяют для стержней с нагрузкой 500...600 кН. Крепление таких стержней в узлах симметрично. Тавровое сечение с неравнобокими уголками используют при необходимости увеличения жесткости стержня в направлении, в котором и располагают более широкие полки.

Двухстенчатые типы сечений применяют для стержней с нагрузкой 600...700 кН и более. Такие сечения имеют большую жесткость, чем одностенчатые.

Подбор сечений сжатых стержней обусловлен требованием обеспечения их устойчивости, зависящей от гибкости, и, следовательно, радиуса инерции сечения, который в этих случаях должен быть максимален. Наибольшую устойчивость обеспечивает сечение из расставленных швеллеров (рис. 2.7, ж, з). Наибольшая требуемая жесткость стержня достигается за счет изменения расстояния между швеллерами.

Для сжатых стержней, в отличие от растянутых, наиболее предпочтительно замкнутое сечение в виде трубы. Такое сечение имеет одинаковую жесткость по всем направлениям. Другим преимуществом трубчатого сечения является меньшее сопротивление ветровой нагрузке.

При проектных расчетах сжатые стержни проверяют на прочность и устойчивость. Гибкость стержней зависит от радиуса инерции сечения, который увеличивается с уменьшением толщины профиля, поэтому при подборе сечения сжатого стержня предпочтение отдается более тонким профилям (в пределах допустимых значений коррозии и местной устойчивости).

Толщина стенок труб в целях обеспечения местной устойчивости может рассчитываться по формуле

$$\delta_{\text{ст}} = 0,864 \sqrt[3]{d},$$

где d — наружный диаметр трубы.

Профиль с толщиной стенок менее 2...3 мм использовать не рекомендуется из-за коррозии.

В основу метода статического расчета ферм положено допущение идеальной шарнирности узлов. Это предполагает, что стержни ферм испытывают только продольные деформации растяжения или сжатия. Однако в реальных условиях узлы имеют относитель-

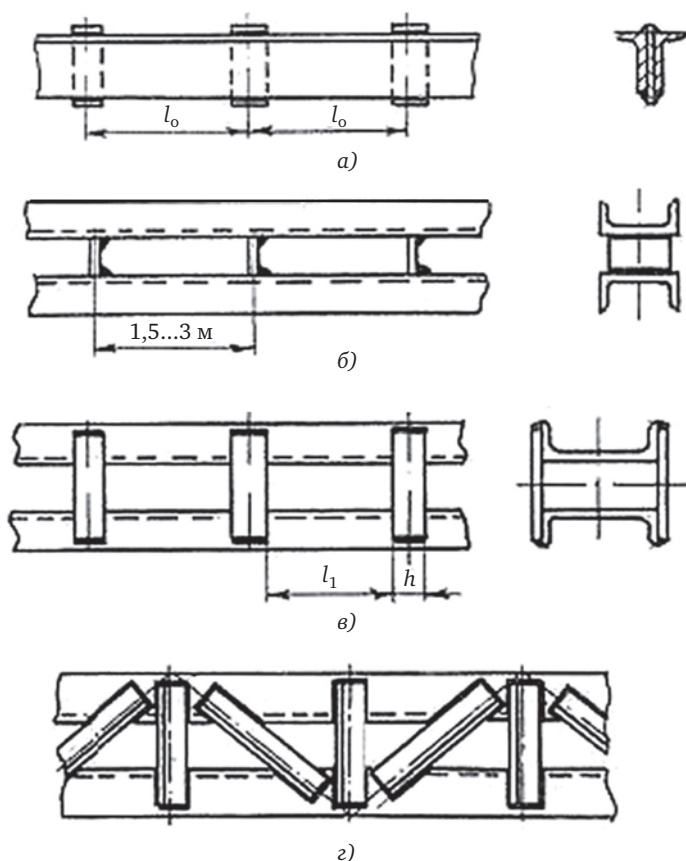


Рис. 2.8. Растянутые составные стержни:

а — одностенчатые; б—г — двухстенчатые сечения

но жесткие сварные или клепаные соединения, ограничивающие свободу смещения концов стержней относительно центра узла. Вследствие этого стержни изгибаются. Возникающие в этом случае напряжения в стержнях, обусловленные жесткостью в узлах, являются дополнительными и обычно при расчетах не учитываются (перекрываются общепринятым запасом прочности). Меньшие дополнительные напряжения возникают в фермах с простыми решетками, например треугольными. Дополнительные напряжения в основном определяются отношением высоты сечения стержня h

к его длине l_0 и могут быть снижены, если при подборе сечений соблюдается соотношение $h/l_0 < 0,1$.

В растянутых составных стержнях (рис. 2.8) для придания большей жесткости и обеспечения совместной работы на отдельных участках по длине стержней устанавливаются соединительные планки (рис. 2.8, а). В соответствии с нормами проектирования металлоконструкций расстояние l_0 между осями планок принимается $l_0 \leq 80i$, где i — радиус инерции одного уголка относительно собственной оси, параллельной плоскости планки.

Ширина планки составляет 80...120 мм, толщина равна зазору между элементами сечения. В растянутых стержнях с двухстенчатыми сечениями планки заменяют диафрагмами — листами, которые приваривают к обеим стенкам стержня (рис. 2.8, б). Диафрагмы устанавливают с шагом 1,5...3,0 м.

В стержнях с сечением пространственного типа применяют соединительные планки (рис. 2.8, в) или решетки (рис. 2.8, г). Более просты при производстве планки, имеющие поэтому большее распространение, хотя соединительная решетка придает стержню большую жесткость.

Размещение планок или решеток, а также их сечения определяют расчетом, так как при выпучивании сжатого стержня появляется изгибающий момент, и соединительные планки начинают работать на поперечную силу Q (табл. 2.1). Расчет составных сжатых стержней проводится по приведенной гибкости.

2.1. Значения условной поперечной силы Q

Марка стали	Q , Н
Ст 3, Ст 3кп	200 F^*
15ХСНД, 10Г2СД, 09Г2ДТ	400 F
10ХСНД	450 F

* F — площадь всего сечения стержня, см².

Место пересечения стержней фермы называется узлом. Продольные оси стержней должны пересекаться в центре узла; стержни в узлах должны быть прочно закреплены (рис. 2.9).

Продольная ось уголка проходит через его центр тяжести и отсчитывается от полки уголка. В сварных фермах это расстояние выбирается кратным 5 мм в сторону ближайшего большего числа.

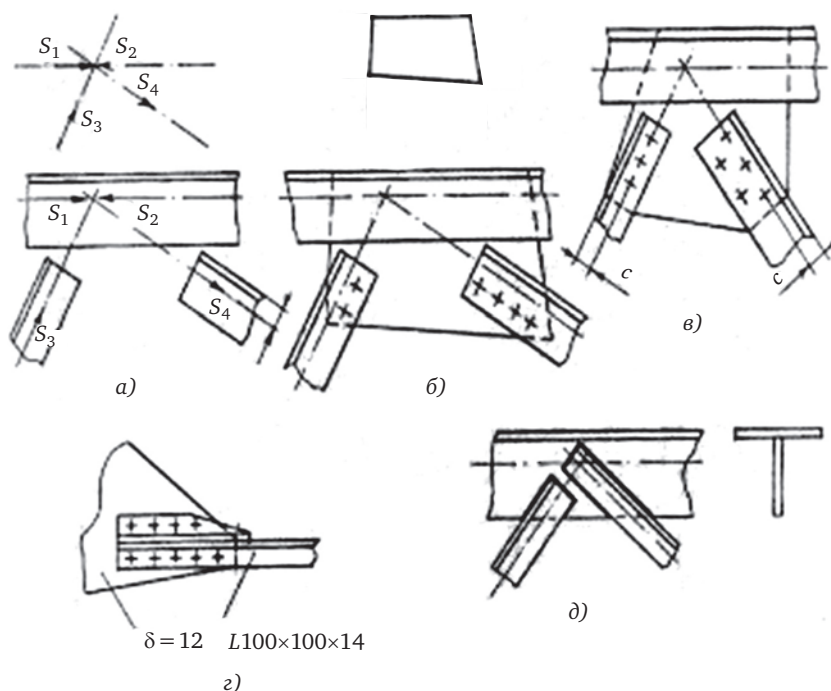


Рис. 2.9. Схемы узловых соединений стержней фермы:

 $S_1 \dots S_4$ — направление сил в стержнях

В клепаных фермах продольная ось совмещается с риской для заклепок, причем для двухрядного уголка — с внутренней риской, ближайшей к поперечной полке уголка (рис. 2.9, а).

Чаще всего узлы компонуются на узловых фасонках (рис. 2.9, б—г). Форма узловых фасонки должна быть возможно более простой, без входящих узлов (рис. 2.9, б). Размеры фасонки определяются длиной швов или количеством заклепок, необходимых для крепления стержней в узлах. Узел получается более компактным, если пояс проходит не прерываясь (рис. 2.9, б, д). В этом случае стык пояса находится в стороне от узла. Прочность крепления каждого стержня в узле проверяется по усилию или по площади сечения. Если пояс проходит в узле не прерываясь, то его прочность крепления рассчитывается по разности усилий в соседних панелях: $S_{\text{расч}} = S_2 - S_1$; ($S_2 > S_1$).

Угол между границей стержней и кромкой фасонки должен составлять не менее 20° . Толщину фасонки принимают в соответствии с воспринимаемыми расчетными усилиями (табл. 2.2).

2.2. Толщины узловых фасонки

Расчетное усилие в раскосе, кН	До 200	200... 500	500... 750	750... 1100	1100... 1600	1600... 2200	2200... 3000
Толщина узловых фасонки, мм	8	10	12	14	16	18	20

При высоких вертикальных стенках таврового сечения пояса-раскосы крепят непосредственно к стенкам (рис. 2.9, д).

Для ферм с трубчатыми стержнями узлы могут проектироваться как с фасонками, так и без них. При отсутствии фасонки стержни подходят непосредственно к узлу (рис. 2.10) — концы примыкающих стержней фигурно обрезают по контуру для их соединения. При необходимости центрирования узлов не всегда имеется возможность устранить независимое крепление каждого из примыкающих стержней. В этом случае крепление выполняется, как показано на рис. 2.10. При отсутствии центровки осей стержней их крепление выполняют с эксцентриситетом e в узлах, который может находиться по обе стороны от основного стержня (рис. 2.11, а, в). Предпочтительный вариант показан на рис. 2.11, а ($e < 0,25d$, где d — наружный диаметр трубы). Расположение эксцентриситета (рис. 2.11, в) допускается в узлах вспомогательных элементов.

Узловые фасонки могут быть пропущены через прорезы, сделанные во всех стержнях или только в примыкающих (рис. 2.12), когда фасонка подходит к основному стержню впритык. Концы примыка-

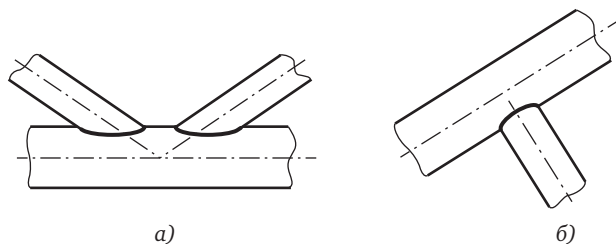


Рис. 2.10. Схемы соединений трубчатых стержней:
а — с подкосом; б — с распоркой

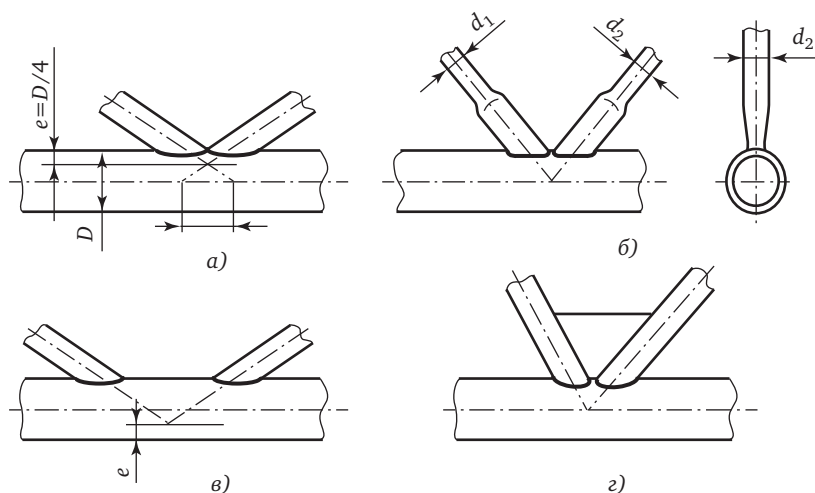


Рис. 2.11. Схемы независимого соединения трубчатых стержней:
 а, в — с эксцентриситетом без центрирования; б — с обжимом концов;
 г — с косынкой

ющих стержней должны быть обжаты таким образом, чтобы можно было осуществить присоединение непрерывным швом.

Для опорных узлов применяют фасонки с опорными ребрами, к которым подходят стержни (концы стержней обрезают перпендикулярно или под углом к продольной оси). Таким образом, отпадает необходимость фасонной резки или обжатия концов. В узле, состоящем из двух стержней (рис. 2.12, е), кроме швов встык, крепление осуществляется дополнительной приваркой угловых фасонки. Если меняется направление поясов фермы, крепление выполняется на вставке (рис. 2.12, ж).

Крепление нескольких стержней (рис. 2.13), направленных в пространстве под разными углами, осуществляется с помощью узловой вставки в виде полого шара, состоящего из отдельных выгнутых листов, к которому стержни присоединяются встык (рис. 2.13, а).

Узлы металлоконструкций антенных сооружений, интенсивно нагруженных переменной нагрузкой, должны иметь достаточную жесткость. Для обеспечения этого в узлах между концами стержней устанавливают диафрагмы в виде угловых фасонки. Возможна установка короткой дополнительной трубы снаружи (рис. 2.13, б).

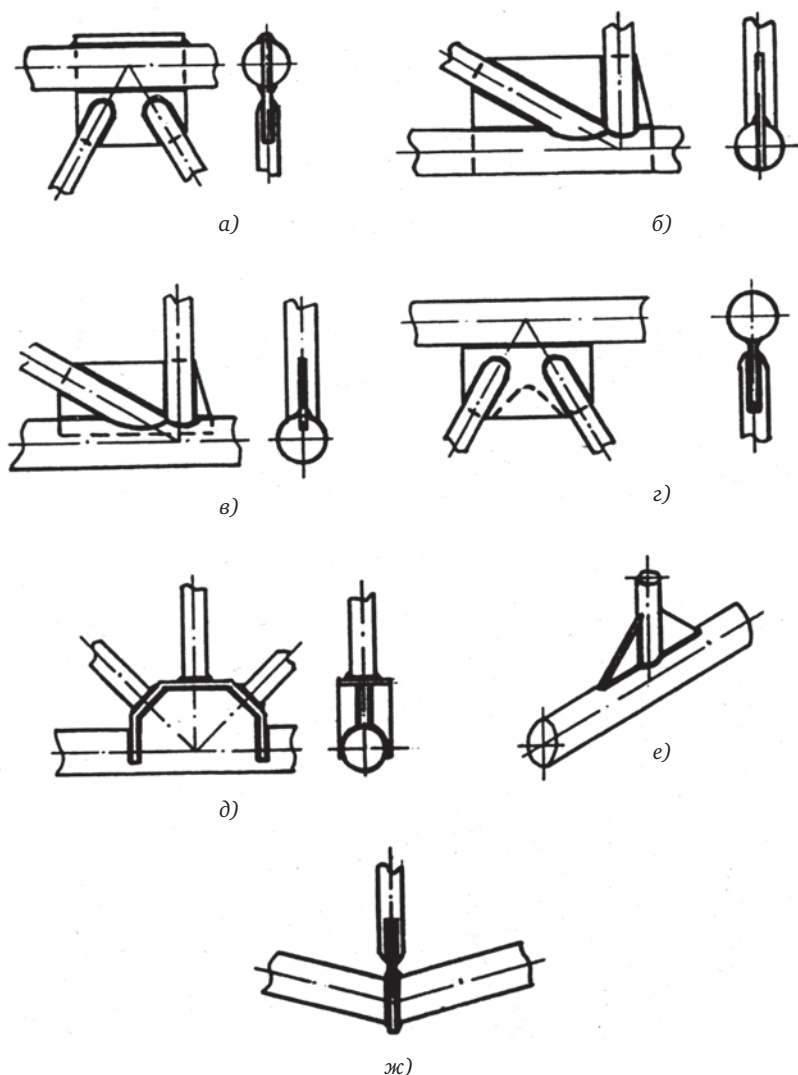


Рис. 2.12. Схемы соединений трубчатых стержней с фасонками:
 а—г — крепление через прорези; д — крепление через вставку; е — крепление с дополнительной фасонкой; ж — крепление с помощью вставки

При установке внутри основного стержня (рис. 2.13, в) узел комплектуется на трубчатой вставке. В других случаях более удобна установка в узле поперечной сплошной диафрагмы (рис. 2.13, г). Длина

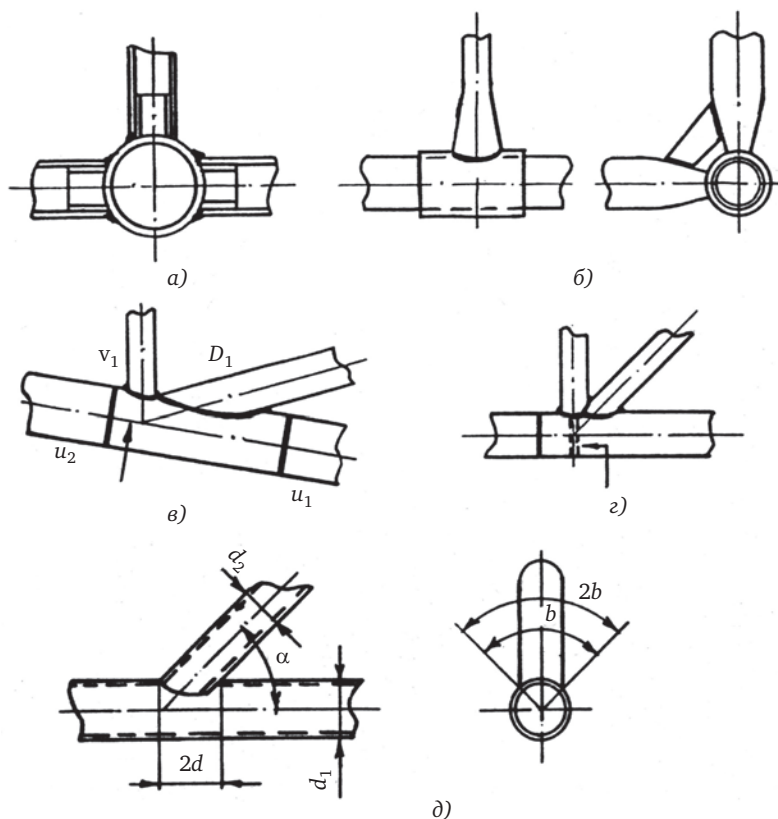


Рис. 2.13. Схемы крепления стержней:

a — с помощью полого шара; *б* — дополнительной трубы; *в* — дополнительной трубчатой вставки; *г* — сплошной диафрагмы; *д* — крепление встык

сварочных швов при креплении встык двух труб определяется как

$$l = a + 3\sqrt{a^2 + b^2},$$

где

$$a = \frac{d_2}{\sin \alpha}; \quad b = \frac{d_2}{3} \frac{3 - (d_2/d_1)^2}{2 - (d_2/d_1)^2}.$$

Присоединение труб встык осуществляется со вставками или без них — с помощью фланцев (рис. 2.14). При соединении труб встык разделка торцов труб производится так же, как для стыкуемых

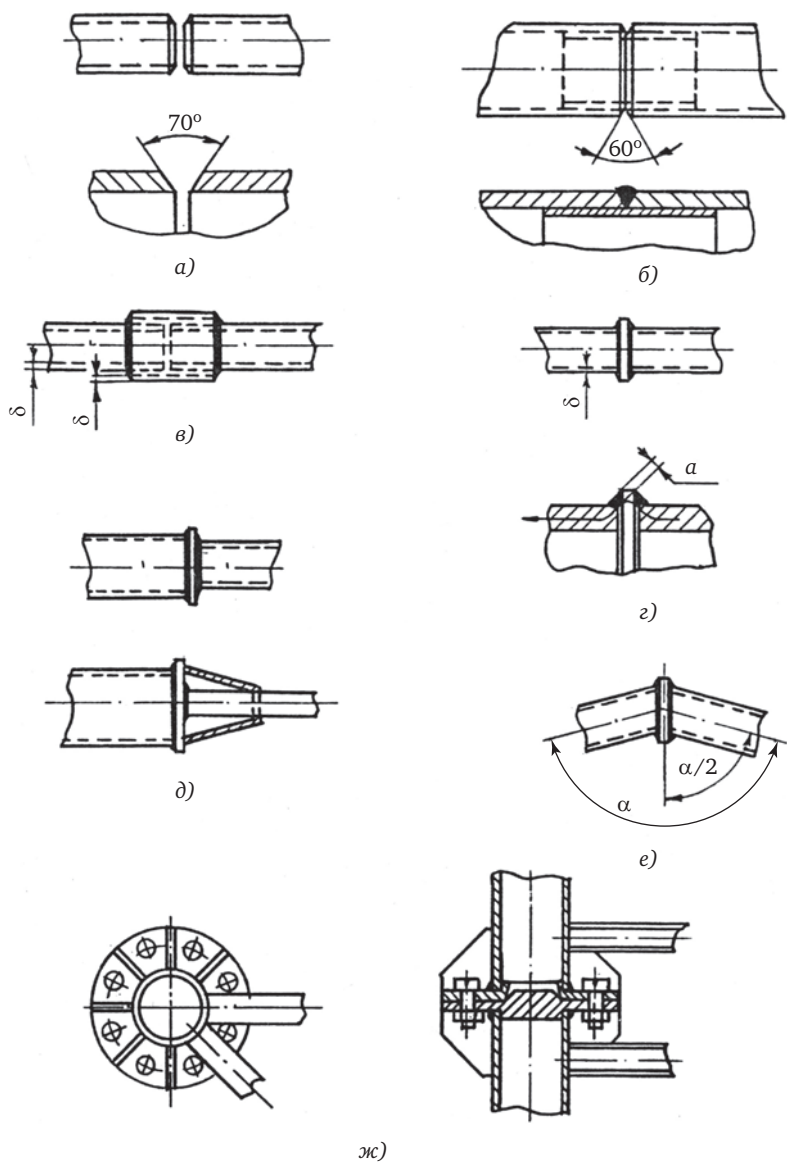


Рис. 2.14. Схемы соединений трубчатых стержней встык:

a — разделка торцев; *б* — соединение с внутренней вставкой; *в* — с внешней вставкой; *г* — с плоской вставкой; *д* — с фасонкой; *е* — с угловой вставкой; *ж* — с фланцем

стержней в сварных конструкциях. Рекомендуется при этом в стык помещать короткую трубчатую вставку или надставку. Возможно также использование плоских вставок.

Такие соединения применяют в месте стыка труб разного диаметра, а также в узлах, где меняется направление стержня. Фланцевые стыки со вставками применяют главным образом для сжатых стержней, болтовое фланцевое — в случае действия поперечных сил.

2.2. Конструкции линзовых антенн

Принцип действия линзовых антенн основан на свойстве линз изменять скорость и распространение электромагнитных волн. В рефлекторных антеннах это обусловлено отражением волн от зеркала, в линзовых — преломлением. Линза, как и рефлектор, преобразует сферический или цилиндрический фронт волны в плоский.

Линзовые антенны подразделяются на замедляющие, ускоряющие и металлопластинчатые.

Коэффициент преломления замедляющих линз $n = \sqrt{\varepsilon} > 1$, ускоряющих — $n < 1$, металлопластинчатых $n = 1$, где ε — диэлектрическая проницаемость материала.

Замедляющие линзы изготавливают из высококачественного органического диэлектрика (полистирол, фторопласт и др.) и искусственного диэлектрика. Их коэффициент преломления $n = 1,3 \dots 1,6$. Искусственный диэлектрик представляет собой пространственную решетку из металлических шариков или дисков, помещенных в среду, имеющую $\varepsilon \approx 1$. Форма, размеры и характер размещения частиц определяют значение ε .

Профиль замедляющей линзы (рис. 2.15) описывается уравнением гиперболы

$$\rho = (n-1)f(n \cos \theta - 1).$$

Достоинством диэлектрических линзовых антенн является их диапозонность, определяемая только диапозонностью облучателя. К недостаткам относятся большая толщина, масса и высокая стоимость. Из-за по-

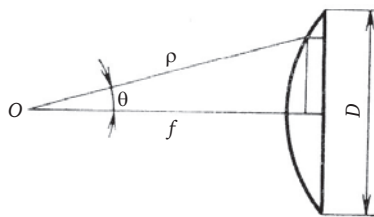


Рис. 2.15. Схема замедляющей линзы:

D — диаметр; f — фокусное расстояние; ρ и θ — полярные координаты

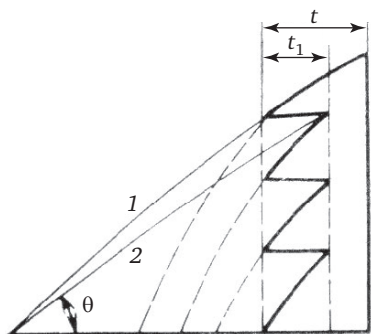


Рис. 2.16. Схема зонированной линзы:

t — габаритный размер линзы;
 t_1 — глубина зонирования; 1 и 2 —
 плоскость зонирования

терь в материале линзы и отражения от поверхностей КПД линзы из органических (естественных) диэлектриков составляет 0,75...0,80, из искусственных — 0,9.

Для уменьшения толщины линзы применяют зонирование, которое основано на том, что скачкообразное изменение фазы поля в раскрыве (кратное 2π), не изменяет фазовых соотношений. Освещенную поверхность линзы выполняют ступенчатой путем нанесения сетки гипербола (рис. 2.16), смещенных от освещенной поверхности на величину $t_1 = \lambda / (n - \cos \theta)$. Величина t_1 выбира-

ется из условия прочности. Недостатки зонирования: уменьшается диапазонность; поле, падающее на ступеньки, не фокусируется.

Ускоряющие линзовые антенны состоят из нескольких металлических пластин, расположенных одна от другой на расстоянии a , которое меньше λ , но больше $\lambda/2$ (рис. 2.17). Между пластинами проходят волны, возбуждаемые облучателем, с составляющей электрического поля, параллельной поверхности пластин. Пластины линзы играют такую же роль, как узкие стенки прямоугольного волновода. Коэффициент преломления металлопластинчатой линзы

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2},$$

где c — скорость света; u — фазовая скорость.

Диапазон коэффициента преломления составляет от 0 до 0,856. Ускоряющие линзы должны иметь на осевой линии минимальную толщину. Профиль линзы описывается уравнением эллипса

$$\rho = f(1 - n) / (1 - n \cos \theta).$$

Линзовые антенны, как и зеркальные, требуют высокой точности изготовления профиля и точности совмещения фазового центра облучателя с фокусом. При этом для линзовых антенн добавляется

требование однородности материала линз ($n = \text{const}$). При допустимой фазовой ошибке в апертуре, равной $\lambda/4$, искажения профиля не должны превышать $\Delta\rho \leq \lambda/8(1-n)$. Допуск на коэффициент преломления $\Delta n \leq \lambda/16t$. В одноповерхностной линзе при перемещении облучателя из фокуса в фокальной плоскости фазовые ошибки резко возрастают.

В радиодиапазоне линзовые антенны с электромеханическим сканированием выполняют из линз с двумя преломляющими поверхностями. Формы обеих поверхностей подбирают так, чтобы обеспечить минимальные фазовые искажения поля в апертуре при заданном секторе отклонения луча, поэтому их называют апланатическими. Так, широкоугольный апланат с $n = 1,6$ позволяет отклонять ДН на угол, составляющий 6...8 ширины луча.

Для широкоугольного сканирования применяют линзы с переменным коэффициентом преломления. Классическим примером таких линз является сферическая линза Люнеберга (рис. 2.18). Она представляет собой диэлектрическую сферу с коэффициентом преломления, изменяющимся по радиусу

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/R)^2}.$$

Фокус линзы находится вне сферы. Линза Люнеберга позволяет формировать ДН в полном телесном угле 4π . Облучатель (точечный, обычно рупорный) перемещается по поверхности сферы, или ставится несколько переключаемых облучателей.

Недостатком такой линзы является очень сложная технология изготовления. Коэффициент преломления по радиусу можно формировать за счет переменной плотности материала или создания линзы из полусферических слоев (коэффициент преломления будет ступенчатым). Для обеспечения небольшого скачка изменения n число слоев должно быть велико.

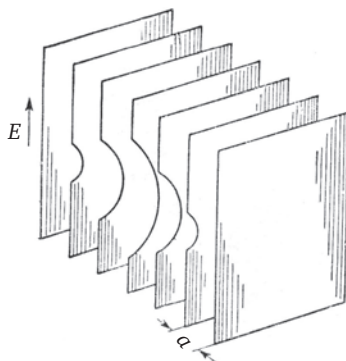


Рис. 2.17. Схема ускоряющей линзы:

a — расстояние между пластинами; E — вектор электромагнитного поля

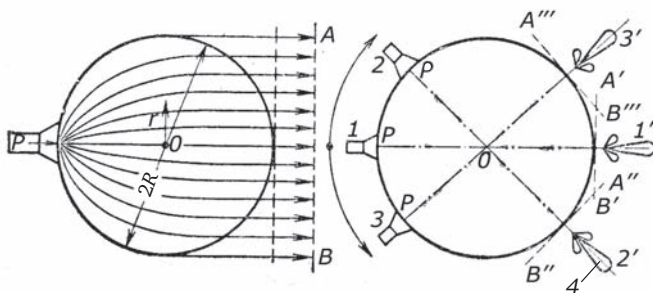


Рис. 2.18. Схема линзы Люнеберга:

1—3 — облучатели; 4 — диаграмма направленности; A—B — плоский фронт волны; R — радиус линзы; r — текущая координата

Линзы ускоряющих антенн могут быть не только сферическими, но и цилиндрическими. В цилиндрических линзах облучатель должен быть линейным.

2.3. Конструкции рупорных антенн

Рупорная антенна представляет собой волновод с плавно увеличивающимся размером поперечного сечения. Наиболее распространенные типы рупоров показаны на рис. 2.19.

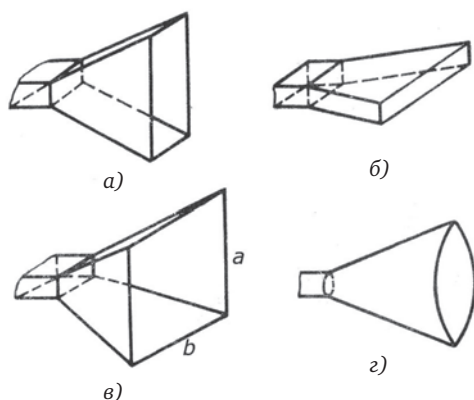
Амплитудное распределение поля в апертуре рупора будет таким же, как и в питающем волноводе. Фаза же в раскрыве рупора изменяется по квадратичному закону

$$\Phi_H = \pi x^2 / \lambda R_E, \quad \Phi_E = \pi y^2 / \lambda R_H.$$

При приближенном расчете на значение фазовой ошибки в апертуре налагаются ограничения: главный максимум ДН должен искажаться незначительно. Так, для пирамидального рупора допустимым значением фазовой ошибки принято считать величину $\pi/2$. В плоскости H из-за косинусоидального закона изменения амплитуды поля допустимое значение фазовой ошибки увеличивается до $3/4\pi$. Допустимая фазовая ошибка обуславливает длину рупора. При принятых значениях фазовой ошибки получаем

$$R_E > b^2 / 2\lambda, \quad R_H > a3\lambda,$$

где E, H — плоскости электрического и магнитного полей соответственно.

**Рис. 2.19. Типы рупоров:**

a — Е-секторный; *б* — Н-секторный;
в — пирамидальный; *г* — конический

Достоинством рупорной антенны является ее широкополосность, определяемая широкополосностью питающего волновода. КПД рупора практически равен единице. Рупорные антенны просты в изготовлении, однако имеют значительные продольные размеры. Так, увеличение апертуры вдвое увеличивает длину рупора в четыре раза. Например, чтобы создать ДН шириной в 1° , апертура рупора в плоскости E должна быть 51λ , а длина рупора составит $R_E > 1230\lambda$ при $\lambda = 3$ см, $R_E = 36$ м. Таким образом, для создания остронаправленного излучения рупорные антенны малопригодны, поэтому если от рупорной антенны требуется узкая ДН, то антенну комбинируют с фазовым корректором в раскрыве: параболоидом или линзой. По заданной ДН определяют размеры апертуры, затем длину рупора уменьшают до ее размеров. Фазовые ошибки в апертуре корректируют, например, вставленной линзой.

Рупорные антенны применяют и как самостоятельные антенны, и как элементы более сложных антенн. Как самостоятельные антенны их применяют на летательных аппаратах, в радиорелейных линиях, станциях метеослужбы. Очень широко рупорные антенны используют в измерительной технике как эталонные. Кроме того, рупоры часто являются облучателями зеркальных и линзовых антенн и излучающими элементами антенных решеток.

2.4. Расчет конструкций крупногабаритных апертурных антенн

При проверочном расчете несущей способности конструкции антенны выбирают наихудшие сочетания воздействий ветра и положения антенны.

При выбранном произвольном положении антенны по углу места локальная весовая и ветровая нагрузки проектируются на направление фокальной оси p_{ik}^f и на перпендикулярное ему направление p_{ik}^t .

Полученные составляющие представляют как сумму симметричной и кососимметричной сил (рис. 2.20).

Расчетная схема нагрузок на силовой каркас конструкции антенны приведена на рис. 2.21.



Рис 2.20. Схема расчета нагрузок P на антенну

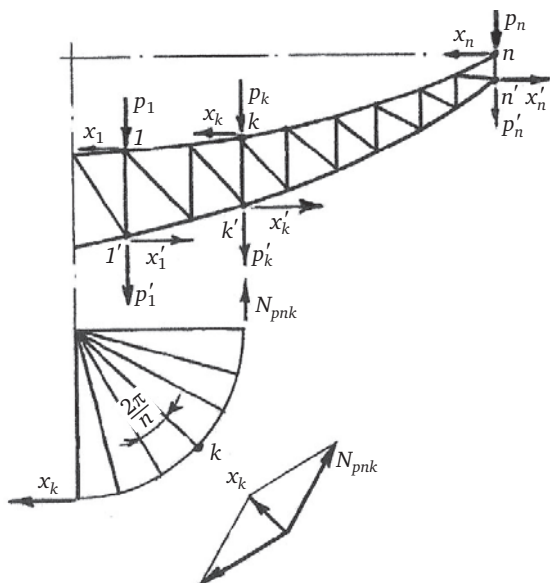


Рис. 2.21. Расчетная схема нагрузок силового каркаса антенны

Усилия от симметрично приложенных сил p_k при одинаковых сечениях ферм могут быть найдены из $2m$ уравнений, где m — число колец в каждой поверхности, в которых неизвестными являются усилия от реакции распорок N :

по параболической поверхности

$$x_k = 2N_{pnk} \sin \frac{2\pi}{n};$$

по наружной (тыльной) поверхности

$$x'_k = 2N'_{pnk} \sin \frac{2\pi}{n}.$$

Общее условие совместности деформаций радиальной фермы и кольца в произвольной k -й точке верхней поверхности и точки k' нижней поверхности имеет вид:

$$\begin{aligned} & [x_1\delta_{k1} + x_2\delta_{k2} + \dots + x_k\delta_{kk} + \dots + x_m\delta_{km}] + \\ & + [x'_1\delta_{k1'} + x'_2\delta_{k2'} + \dots + x_k\delta_{kk} + \dots + x_k\delta_{kk}] + \\ & + [\Delta_{k1} + \Delta_{k2} + \dots + \Delta_{kk} + \dots + \Delta_{km}] + \\ & + [\Delta'_{k1} + \Delta'_{k2} + \dots + \Delta'_{kk'} + \dots + \Delta'_{km'}] \cong \frac{nx_k r_k}{2\pi EF_k}; \\ & [x'_1\delta_{k'1} + x'_2\delta_{k'2} + \dots + x'_k\delta_{k'k} + \dots + x'_1\delta_{k'm}] + \\ & + [x_1\delta_{k'1'} + x_2\delta_{k'2'} + \dots + \delta_{k'k'} + \dots + x_m\delta_{k'm}] + \\ & + [\Delta_{k'1} + \Delta_{k'2} + \dots + \Delta_{k'k} + \dots + \Delta_{k'm}] + \\ & + [\Delta_{k'1'} + \Delta_{k'2'} + \dots + \Delta_{k'k'} + \dots + \Delta_{k'm'}] \cong \frac{nx'_k r_k}{2\pi EF'_k}, \end{aligned}$$

где r_k и F_k — радиус и площадь сечения k -го кольца соответственно.

В значениях δ и Δ первый индекс указывает местоположение точки, для которой ищется перемещение, второй — местоположение единичной силы, от которой находится перемещение:

$$\delta_{pk} = \delta_{kp} = \sum_1^p \frac{\bar{N}_{yx} N_{yp} l_y}{EF_y};$$

$$\Delta_{pk} = \sum_1^p \frac{N'_{yp} \bar{N}_{yp} l_y}{EF_y},$$

где $\bar{N}_{yp}$ — безразмерное усилие в у-м элементе фермы от силы $X = 1$, приложенной в точке k ; N_{yp} — безразмерное усилие в у-м элементе фермы от силы $X = 1$, приложенной в точке p ; l_y , F_y — длина и площадь сечения у-го элемента; N_{yp} — усилие в у-м элементе от силы P_k , приложенной в точке k .

После решения системы линейных уравнений находят значения неизвестных $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m$; $x'_1, x'_2, \dots, x'_k, \dots, x'_m$ и радиальных смещений:

$$\Delta r_k = \frac{x_k r_k}{2 \sin \frac{2\pi}{n} EF_{pnk}} = \frac{\sigma_k r_k}{2E \sin \frac{2\pi}{n}};$$

$$\Delta r'_k = \frac{x'_k r_k}{2EF_{pnk} \sin \frac{2\pi}{n}} = \frac{\sigma'_k r_k}{2E \sin \frac{2\pi}{n}}.$$

Кроме воздействия ветровых нагрузок, собственной массы и распределенных полярно-симметрично нагрузок от веса отражающей поверхности, действуют сосредоточенные силы от конструкции, поддерживающей облучающие устройства. В этом случае число неизвестных увеличивается обычно до $2mn/4 = mn/2$. Усилия от кососимметрично приложенных сил при одинаковых сечениях ферм и соответствующих элементов могут быть определены исходя из решения системы линейных уравнений, где неизвестными являются: нормальные усилия в распорках ($mn/2$ неизвестных); нормальные усилия в раскосах (mn неизвестных); поперечные силы в кольцевых балках ($mn/4$ неизвестных). Всего $7mn/4$ неизвестных.

Возникающие усилия в распорках и фермах могут быть найдены, как в статически определимой системе, при условии, что кольца и фермы в плоскости кольца соединены между собой шарнирно. В первом приближении при распределенной кососимметричной нагрузке можно пренебречь статической неопределимостью систе-

мы в целом и решать отдельно каждую радиальную ферму. Определение отклонений узлов радиальных ферм в направлении, перпендикулярном плоскости фермы, ведется с учетом условия, что точки, лежащие в плоскости симметрии (в вертикальной плоскости), не имеют поперечных (горизонтальных) смещений.

При оценке работоспособности антенны различают геометрические искажения формы и положения элементов антенны, влияющие на чувствительность и усиление антенны (апертурные) и на погрешности наведения. Суммарные апертурные искажения складываются из начальных (технологических) и эксплуатационных. Начальные искажения зависят от точности изготовления, монтажа и выверки и носят случайный характер. Эксплуатационные искажения имеют систематический характер и возникают вследствие деформирования конструкций антенны при ее вращении от действия сил тяжести, инерционных сил, ветра, температуры и т.д.

У полноповоротных зеркальных антенн, работающих в диапазоне $\lambda \leq 100$ мм, выбор конструктивной формы и подбор сечений определяются условием работоспособности в зависимости от принятого уровня эффективности работы антенны, при достижении которого прочность и устойчивость конструкции сохраняются, но дальнейшая эксплуатация недопустима вследствие ухудшения радиотехнических параметров антенны.

Значение эффективности зависит от деформации антенного полотна, которую вычисляют в функции нормативных нагрузок. В качестве нормативного скоростного эксплуатационного напора ветра принимают $q_{нэ}^B$, который определяется по СНиП, но с учетом задаваемой обеспеченности работы антенны по времени:

$$q_{нэ} = \left(\frac{u_{10}^{нэ}}{u_{10}^B} \right)^2 q_n^B,$$

где u_{10}^H и $u_{10}^{нэ}$ — скорости ветра на высоте 10 м над землей соответственно максимальной интенсивности и соответствующей нормируемому на q_n^B , при заданной обеспеченности p , %, по времени.

Эксплуатационные искажения отражающей поверхности зеркала обусловлены деформацией несущего каркаса, проявляющейся в перемещениях узловых его точек, в которых производится опирание щитов отражающей поверхности, и собственно деформациями

рабочей поверхности щитов. При размерах щита менее двух метров его деформации незначительны, поэтому могут не учитываться.

2.5. Конструкции опор апертурных антенн

Выбор конструкций опор апертурных антенн во многом зависит от направленности антенны. Используют антенные опоры полноповоротные, с ограниченным углом поворота, поворотные в одном измерении и неподвижные.

Полноповоротные антенные опоры имеют две оси вращения и обеспечивают поворот антенны в пределах телесного угла 2π или близкого к нему. Опоры с ограниченным углом поворота также имеют две оси вращения, но угол их поворота значительно меньше, чем у полноповоротных и, как правило, не превышает по одной или обеим осям $15...20^\circ$. Отличительной особенностью таких опор является использование механизмов вращения с поступательно движущимся (например, передача винт—гайка) выходным звеном. Опоры поворотные в одном измерении имеют одну ось вращения, а неподвижные осей вращения не имеют. Общим требованием, предъявляемым к опорам апертурных антенн, является их жесткость. Жесткость опор поворотных и неповоротных устройств должна быть выше жесткости самой антенны. Для удовлетворения этого требования опоры выполняют в виде мощных конструкций из толстолистовой (чаще низколегированной) стали, стального литья или в виде ферменных конструкций.

Существует три вида опор зеркал апертурных антенн: башенный, катковый и мостобашенный (рис. 2.22). Башенный вид опоры радиотелескопа целесообразно применять при диаметрах зеркала до 70 м.

При больших диаметрах зеркала следует применять катковую опору. В башенном типе радиотелескопа (рис. 2.23) механизмы

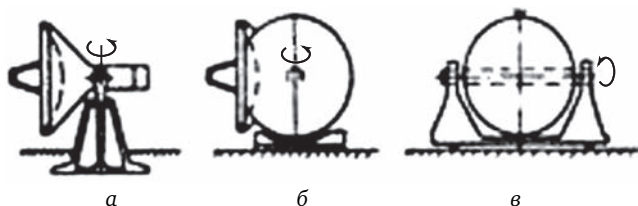


Рис. 2.22. Виды опор поворотных устройств зеркальных антенн:

а — башенная; б — катковая; в — мостобашенная

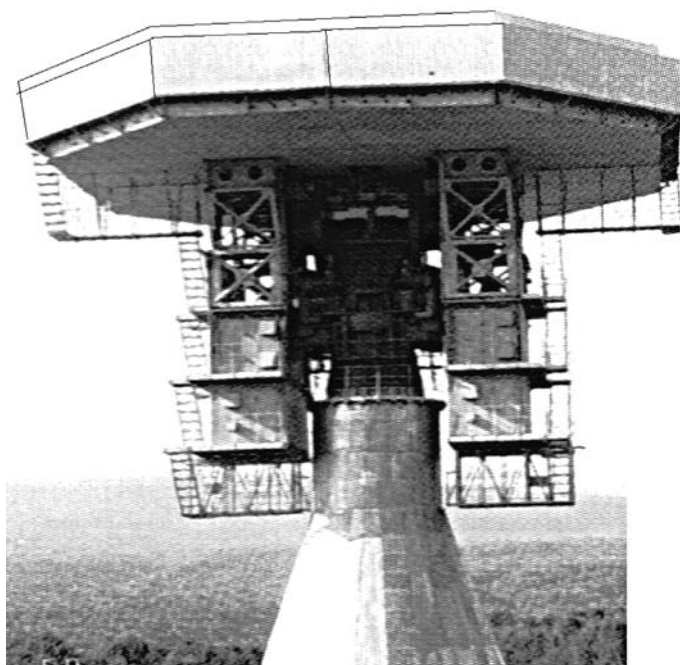


Рис. 2.23. Антенное устройство башенного типа

вращения состоят из угломестного вала с подшипниками; цевочного зацепления и механизмов вращения по углу места; опорного и радиальных подшипников вертикальной (азимутальной) оси; цевочного зацепления и механизма вращения азимутальной оси.

Расчет и проектирование опорных устройств производят исходя из действующих на него нагрузок, которые определяются скоростью и ускорением вращения антенны, ее массой, моментами инерции этой массы с учетом гололеда, ветрового момента, а также моментом трения

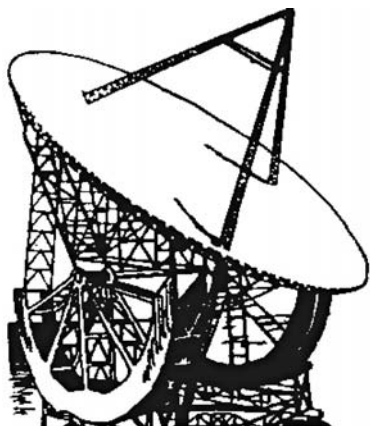


Рис. 2.24. Антенное устройство каткового типа

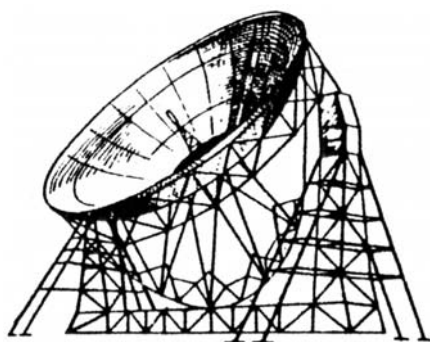


Рис. 2.25. Антенное устройство мостобашенного типа

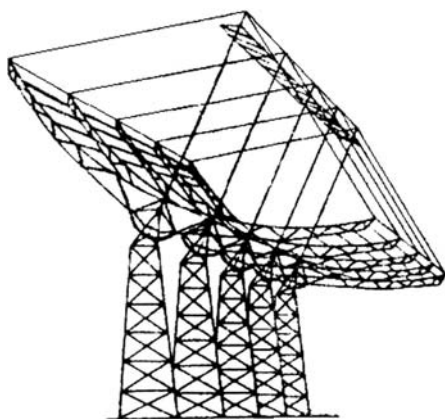


Рис 2.26. Конструкция опоры одноосного поворотного устройства

в подшипниках и редукторе, массовыми моментами инерции вращающихся частей, редуктора, муфты и якоря электродвигателя.

Ветровой момент определяют с учетом скорости ветра, площади поверхности антенны, ее конфигурации. Угломестная часть опорного устройства должна состыковываться с антенной по габаритным и присоединительным размерам. Основание азимутальной части состыковывается с опорным кольцом, которое анкерными болтами крепится к железобетонному основанию.

В катковом типе радиотелескопа (рис. 2.24) вращение по углу места осуществляется поворотом зеркальной системы с помощью специальных катков, расположенных по окружности с центром у угломестной оси вращения. Катки азимутальной части радиотелескопа размещены на горизонтальной платформе, которая имеет в центре вертикальную (азимутальную) ось, а по периферии — систему тележек, располагаемых на рельсовых путях. Схема радиотелескопа мостобашенного типа приведена на рис. 2.25.

Недостатком опоры этого типа является отсутствие полярной симметрии в конструкции зеркала. Вследствие этого значение среднеквадратичных отклонений поверхности зеркала существенно больше, нежели при других видах опор.

На рис. 2.26 представлена конструкция в одном измерении — по углу места. Эта опора представляет собой ферменную конструкцию, высота которой зависит от размера раскрытия антенны.

2.6. Нагрузки и воздействия на апертурные антенны

Антенные устройства в процессе эксплуатации подвергаются воздействию климатических и геофизических факторов, характерных для района их размещения: ветер, гололед, температура, сейсмическое воздействие. Эти факторы приводят к возникновению напряжений и деформаций в элементах конструкций, уровень которых определяет работоспособность антенных устройств.

Деформации антенны приводят к искажению ее геометрии и, следовательно, к ухудшению радиотехнических параметров, а деформации опоры — к отклонению положения антенны, т.е. к угловой ошибке направления максимума излучения или направления фокальной оси.

Весовая, гололедная нагрузки и температурное воздействие оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние как одномерных конструкций с низкой жесткостью (например проволочные антенны), так и многомерных антенн с большой апертурой, площадь которых составляет десятки или сотни квадратных метров. Для антенн с небольшой апертурой основным видом эксплуатационного воздействия является ветер.

Ветровая нагрузка. При расчете ветровой нагрузки существенное значение имеют аэродинамические свойства конструкции (форма, ориентация и др.).

Аэродинамическую нагрузку в общем случае можно привести к результирующей силе и моменту, меняющимся по величине и направлению в зависимости от ориентации рефлектора по отношению к направлению ветрового потока.

Параболические антенны относятся к плохо обтекаемым телам, аэродинамические свойства которых остаются практически постоянными при скоростях ветра до 50...60 м/с независимо от их размера.

Наиболее широко распространены антенны в виде симметричной вырезки из параболоида вращения со сплошной или решетчатой поверхностью. Для таких антенн наибольшие значения аэродинамической силы и момента возникают тогда, когда фокальная ось и вектор ветрового потока образуют либо вертикальную, либо горизонтальную плоскость. В первом случае фокальная ось перемещается в вертикальной плоскости (поворот антенны по углу ме-

ста), во втором — фокальная ось горизонтальна (вращение антенны по азимуту). Указанное обстоятельство позволяет свести задачу расчета ветровой нагрузки к плоской, когда результирующая сила в ортогональной системе координат имеет две составляющие (проекции на оси), а момент — одну.

Методики расчета аэродинамической нагрузки (аэродинамических коэффициентов) на параболические отражатели со сплошной и решетчатой поверхностью приведены в приложении 1.

Весовая нагрузка. При расчете на прочность и деформативность антенны весовая нагрузка представляется в виде распределенной. Для расчета антенну разбивают на элементы и определяют центр тяжести и вес каждого из элементов (рис. 2.27). Напряженно-деформированное состояние антенны зависит от ее ориентации в вертикальной плоскости, определяемой углом места. В общем случае весовую нагрузку можно представить в виде двух составляющих в связанной системе координат: $G_{gx} = G_g \sin \alpha$ и $G_{gy} = G_g \cos \alpha$. Первая составляющая осесимметричная — вызывает осесимметричную деформацию, вторая — кососимметричная — вызывает кососимметричную деформацию. Соотношение осесимметричной

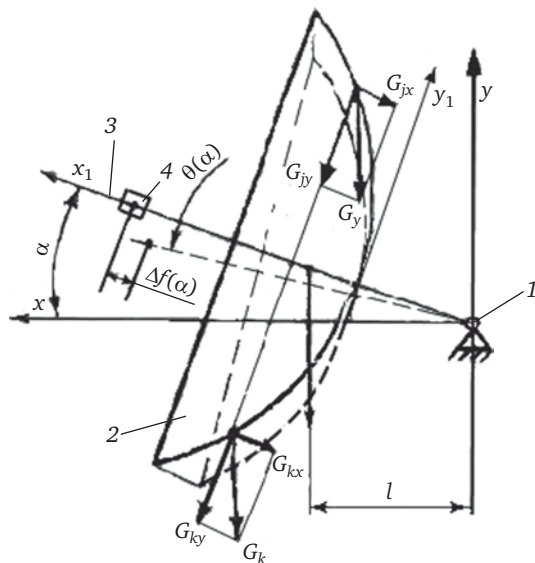


Рис 2.27. Схема расчета весовых нагрузок:

1 — ось вращения; 2 — антенна; 3 — фокальная ось; 4 — фокус

и кососимметричной деформаций является функцией угла места, а их абсолютное значение зависит от размеров антенны и может быть рассчитано достаточно точно для любого положения антенны, например, методом конечных элементов. Это дает возможность компенсировать весовые деформации соответствующей коррекцией положения облучателя: линейной — для осесимметричной составляющей и угловой — для кососимметричной

При расчете весовой нагрузки, действующей на опору, определяется центр масс антенны и ее общий вес G . Момент на угломестную ось будет равен $M_G = Glsin\alpha$. Этот момент может быть полностью компенсирован установкой на угломестной оси противовеса. Часто в качестве противовеса используется контейнер с аппаратурой, благодаря чему достигается существенное сокращение длины высокочастотного тракта.

Гололедная нагрузка. Характер воздействия гололеда на апертурные антенны аналогичен воздействию весовой нагрузки. Гололедная нагрузка носит случайный характер, поэтому компенсировать гололедные деформации не представляется возможным.

Температурное воздействие. Имеет существенное значение для антенн с большой апертурой, особенно выполненных из разнородных материалов, а также для антенн, работающих в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн.

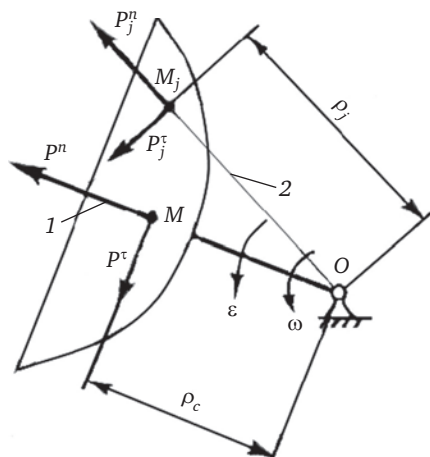


Рис. 2.28. Схема расчета инерционных нагрузок:
1, 2 — положение оси

Инерционные нагрузки. Возникают при вращении антенны относительно какой-либо оси и имеют две составляющие — нормальную и тангенциальную. Величина инерционных нагрузок зависит от размеров антенны, ее массы и скорости вращения (рис. 2.28). Нередко инерционные силы оказывают существенное влияние на работу антенного устройства.

Нормальная составляющая инерционной силы для j -го элемента массой M_j :

$$P_j^n = M_j a_j^n,$$

где $a_j^n = \rho_j \omega^2$; ω — угловая скорость антенны относительно центра O .

Силы P_j^n осесимметричны, поэтому вызывают осесимметричные деформации и напряжения антенного полотна. Тангенциальная составляющая инерционной силы возникает при переходных процессах (разгон или торможение), когда угловое ускорение не равно нулю, и для j -го элемента определяется по формуле

$$P_j^\tau = M_j a_j^\tau,$$

где $a_j^\tau = \rho_j \varepsilon$.

Силы P_j^τ кососимметричны и соответственно вызывают кососимметричные деформации и напряжения антенного полотна.

При расчетах опорноповоротного устройства определяются только результирующие инерционные силы и моменты этих сил относительно соответствующей оси:

$$P_j^n = M \rho_c \omega^2;$$

$$P^\tau = M \rho_c \omega,$$

где M — масса антенны; ρ_c — расстояние от оси вращения до центра масс. Линия действия нормальной составляющей проходит через ось вращения, поэтому момент этой силы равен нулю. Момент тангенциальной составляющей

$$M^\tau = P^\tau \rho_c = M \rho_c^2 \varepsilon.$$

Вибрационное и ударное воздействия возникают при транспортировании антенн или их составных частей, а также при функционировании собственных узлов и агрегатов антенного устройства.

Фазированные антенные решетки

Фазированные антенные решетки (ФАР) — это антенные системы, состоящие из элементов с независимым управлением фазой. Антенная решетка состоит из ряда отдельных излучающих элементов, расположенных соответствующим образом относительно друг друга. Амплитуды и фазы сигналов, подаваемых на эти элементы, подбирают так, чтобы получить заданную ДН в результате совместного действия всех элементов. При этом сканирование луча осуществляется изменением фазовых сдвигов возбуждения отдельных элементов решетки. Фазовое распределение осуществляют с помощью электронных устройств, инерционность которых на несколько порядков меньше инерционности устройств, используемых для механического и электромеханического сканирования. Этим антенная решетка в принципе отличается от апертурных антенн.

Зеркальные и линзовые апертурные антенны обеспечивают получение соответствующих фазовых фронтов волн после облучения этих устройств точечным источником-облучателем. Фронт волны при выходе из облучателя имеет сферическую форму. Сферическая волна преобразуется в плоскую в результате действия зеркала или линзы. В антенной решетке соответствующие фазовые соотношения обеспечиваются до излучения сигнала, т.е. в антенно-фидерной системе. В отличие от других антенн распределение фазы в раскрыве антенной решетки может регулироваться, что и является характерным признаком решетки. Применение ФАР позволяет осуществлять быстрое сканирование (на несколько порядков быстрее механического и электромеханического); управлять формой

ДН; увеличить излучаемую мощность за счет сложения во внешнем пространстве мощностей большого числа генераторов, размещенных в каналах излучателей; повысить помехозащищенность радиосистемы; применять различные методы обработки сигналов.

Применение ФАР необходимо в тех случаях, когда требуются узкие диаграммы направленности, а это означает, что число излучателей в фазированных решетках велико — может достигать $10^3 \dots 10^5$. Таким образом, вполне очевидной является проблема возбуждения большого числа элементов. При создании подобных многоэлементных систем возникает проблема формирования луча и управления им. Одной из сложных теоретических проблем является определение взаимного влияния элементов решетки.

Практическая реализация достоинств ФАР оказалась возможной после разработки таких элементов, как фазовращатели, переключатели, делители мощности, развязывающие элементы, усилители и генераторы для активных решеток, направленные фильтры для многочастотных решеток и др.

В настоящее время применяют и разрабатывают самые разнообразные фазированные решетки для различных диапазонов волн с различным числом излучателей, размещаемых на плоских и выпуклых поверхностях.

3.1. Основные свойства ФАР

Одним из наиболее распространенных типов ФАР являются плоские решетки. В большинстве случаев плоская фазированная решетка состоит из идентичных излучателей, расположенных в узлах плоской координатной сети с двойной периодичностью. Наиболее широко применяются прямоугольная и треугольная (или гексагональная) сети (рис. 3.1).

Диаграмма направленности излучателя в решетке не отличается от диаграммы направленности изолированного излучателя.

Фаза возбуждения излучателей в решетке при остронаправленном излучении обеспечивает синфазное сложение полей в заданном направлении и зависит от положения излучателя в решетке.

Характеристика направленности решетки может быть представлена в виде произведения характеристики направленности изолированного излучателя $F(\theta, \varphi)$ на множитель решетки, который

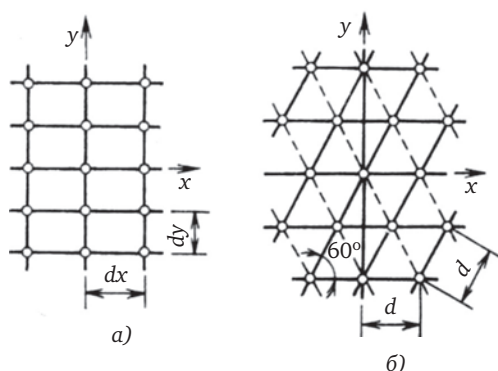


Рис 3.1. Прямоугольная (а) и гексогональная (б) сети излучателей ФАР

можно рассматривать как характеристику направленности решетки, состоящей из изотропных излучателей:

$$F(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) F_{\Sigma}(\theta, \varphi),$$

где θ, φ — углы сферической системы координат, определяющей направление луча в пространстве; $F_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ — множитель решетки (рис. 3.2).

При размещении излучателей в узлах координатной сети с двойной периодичностью синфазное сложение полей отдельных излучателей решетки возможно не только в направлении главного максимума диаграммы направленности, но и в других направлениях, которым соответствует пространственный фазовый сдвиг, компенсирующий сдвиг фазы между излучателями из-за возбуждения. Следовательно, кроме основного луча решетки существуют еще дифракционные максимумы высших порядков.

В отличие от направления основного луча пространственная ориентация дифракционных максимумов зависит от расстояния между излучателями. При уменьшении расстояния между излучателями число дифракционных максимумов, находящихся в области действительных углов, уменьшается. Для нормальной работы решетки необходимо, чтобы в области дей-

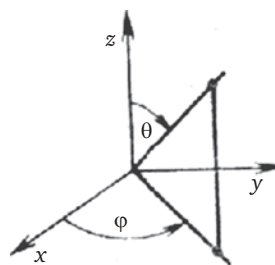


Рис 3.2. Углы сферической системы координат, определяющей направление луча в пространстве

ствительных углов находился лишь один главный луч решетки, а дифракционные максимумы отсутствовали.

Использование треугольной сетки вместо прямоугольной позволяет увеличить расстояние между излучателями и уменьшить их общее число. Если характеристика направленности излучателя решетки отлична от нуля в пределах сектора сканирования и равна или близка к нулю вне пределов указанного сектора, то можно допустить существование дифракционных максимумов высших порядков в области действительных углов. Диаграммы направленности реальных излучателей отличаются от идеальной, поэтому число излучателей в реальных сканирующих решетках больше минимально возможного.

Для управления решеткой достаточно подвести $M + N$ управляющих сигналов (по числу столбцов и строк соответственно), содержащих в определенном коде значения фазовых сдвигов между столбцами и строками. Эти сигналы поступают в фазовращатели, расположенные на пересечении соответствующих строк и столбцов, и сумматор в цепи управления фазовращателя, выполнив суммирование, образует код, соответствующий фазе возбуждения излучателя. Подобный способ управления решеткой называется строчно-столбцовым.

Число управляющих сигналов в решетках с треугольной сеткой может быть равно числу сигналов в решетках с прямоугольной сеткой при выделении в структуре излучателей неортогональных строк и столбцов, однако при этом усложняется процедура вычисления управляющих сигналов. При выделении ортогональных столбцов и строк в решетках с треугольной сеткой общее число управляющих сигналов в два раза больше, чем в решетках с прямоугольной сеткой.

3.2. Схемы построения ФАР

По схеме возбуждения излучателей ФАР делятся на ФАР с оптической и фидерной системами питания.

Схемы с оптической системой питания делятся на проходные и отражательные (рис. 3.3). В проходных схемах энергия от облучателя попадает на коллекторную решетку, проходит через высокочастотные цепи и фазовращатели, а затем переизлучается в требу-



Рис. 3.3. Схемы ФАР с оптической системой питания проходного (а) и отражательного (б) типов

емом направлении другой решеткой. ФАР с оптической системой питания проходного типа показана на рис. 3.4

В ФАР отражательного типа коллекторная и переизлучающая решетки совмещены в одной. Мощность, принятая от облучателя после фазирования, переизлучается в требуемом направлении.

Достоинством ФАР с оптической системой питания является простота изготовления при большом числе излучателей.

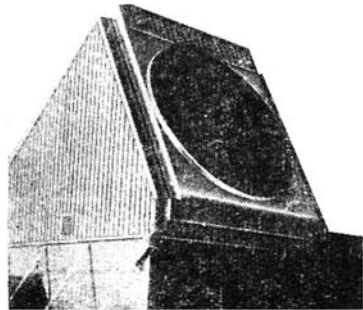


Рис. 3.4. ФАР с оптической системой питания проходного типа

Преимуществом решеток отражательного типа является удобство при эксплуатации — доступность элементов решетки для настройки и замены с неизлучающей стороны. В решетке проходного типа можно получить лучшие функциональные характеристики за счет оптимизации коллекторной и переизлучающей решеток.

Недостатком решеток с оптической системой питания является «переливание» энергии за края решетки подобно тому, как это происходит в зеркальных антеннах. Переливание энергии является причиной уменьшения коэффициента использования поверхности и увеличения фона бокового излучения.

Схемы ФАР с фидерными системами питания приведены на рис. 3.5. При последовательном делении мощности фазовращатели могут быть включены в боковые ответвления фидерного тракта, идущие к излучателям (см. рис. 3.5, а). В этом случае через каж-

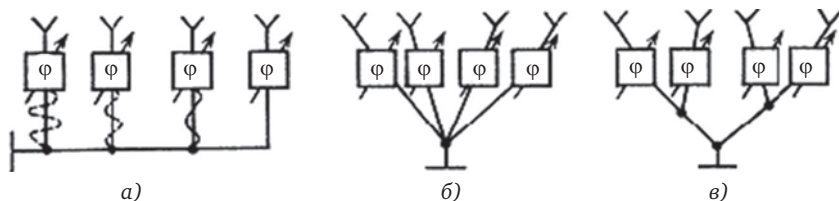


Рис. 3.5. Схемы ФАР с фидерными системами питания:

а — последовательное деление мощности; *б* — параллельное деление мощности;
в — двоично-этажная схема деления

дый фазовращатель проходит $1/N$ доля мощности, а потери мощности определяются потерями, вносимыми одним фазовращателем. Недостатком данной схемы является различие длин путей от входа до излучателей, что может привести к расфазированию антенны на краях частотного диапазона. Для устранения расфазирования в боковые ответвления необходимо включать компенсационные отрезки фидера, выравнивающие электрические пути от входа до излучателей.

При параллельной схеме деления мощности (см. рис. 3.5, б), которая также позволяет использовать маломощные фазовращатели, общие потери мощности определяются потерями в одном фазовращателе. При этом имеется возможность выравнивания длин отдельных каналов для обеспечения широкополосности. Недостатком параллельной схемы является сложность согласования при делении мощности на большое число каналов. К параллельным относится и двоично-этажная схема деления (см. рис. 3.5, в), в каждом узле которой мощность делится на две части. Деление может быть равным и неравным. При равном делении двоично-этажная схема может быть сделана широкополосной за счет использования отрезков фидера равной длины от входа до каждого излучателя. При неравном делении в полосе частот фазовые и амплитудные искажения в выходных линиях разветвлений будут большими, а полоса уже, чем при равном делении.

В качестве делителей мощности могут использоваться различные узлы: волноводные и коаксиальные тройники, волноводные мосты, направленные ответвители на связанных полосковых линиях, а также кольцевые резистивные делители мощности на полосковых линиях.

Кроме перечисленных схем делителей мощности, возможно применение и комбинированных схем.

Фазовращатели ФАР

Для управления фазой возбуждений излучателей в фазированных решетках используют ферритовые и цифровые фазовращатели. Основные требования к фазовращателям ФАР:

- минимальное время переключения (несколько микросекунд);
- минимальная управляющая мощность (высокий уровень управляющей мощности ведет к перегреву и требует громоздких источников питания);
- минимальная фазовая ошибка;
- высокая импульсная и средняя излучающая мощность (типичные значения $P_{\text{имп}} = 1 \dots 100 \text{ кВт}$, $P_{\text{ср}} = 1 \dots 500 \text{ Вт}$);
- минимальные габариты (должен уместиться в объеме с поперечным сечением $\lambda/2 \times \lambda/2$);
- минимальная масса (особенно в мобильных и бортовых системах)
- минимальная стоимость.

Фазовращатели можно разделить на следующие группы: механические, плазменные, ферритовые и полупроводниковые. Механические и плазменные фазовращатели в настоящее время не применяют, поэтому далее будут рассматриваться только ферритовые и полупроводниковые.

Ферритовые фазовращатели состоят из линии передачи (волноводной, коаксиальной или полосковой), содержащей намагниченный феррит. Управление фазой высокочастотных колебаний осуществляется изменением подмагничивающего поля и, следовательно, изменением магнитной проницаемости феррита. Это приводит к изменению электрической длины фазовращателя. На рис. 3.6 приведена схема конструкции четырехсекционного дискретного фазовращателя. Ферромагнитный сердечник 1 размещается на части волновода 2; через отверстие в сердечнике проходит управляющая обмотка 3; крепление сердечника к волноводу осуществляется через диэлектрик.

Такой фазовращатель относится к числу невзаимных. Невзаимными являются фазовращатели, параметры которых зависят от направления распространения электромагнитной энергии. Фазовый

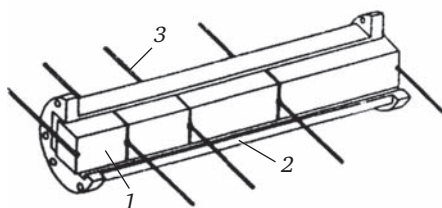


Рис 3.6. Схема конструкции невзаимного ферритового фазовращателя:

- 1 — ферромагнитный сердечник;
- 2 — волновод;
- 3 — управляющая обмотка

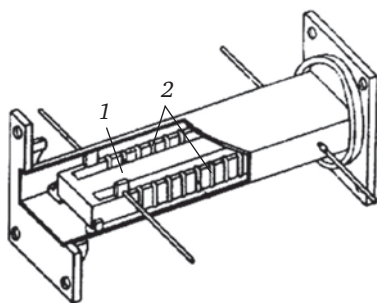


Рис 3.7. Схема конструкции взаимного ферритового фазовращателя:

- 1 — сердечник; 2 — внешние секции

сдвиг во взаимных ферритовых фазовращателях не зависит от направления распространения высокочастотной энергии.

На рис. 3.7 представлена схема конструкции взаимного волнового фазовращателя для диапазона 4...12 ГГц с продольным магнитным полем и с внутриволноводной коммутационной системой. Коммутационная система включает в себя двойной тороидальный сердечник, состоящий из центральной и двух внешних секций.

Цифровые фазовращатели состоят из p каскадов, каждый из которых находится в одном из двух состояний, характеризующихся вносимым фазовым сдвигом 0 или $\pi/2^{m-1}$, где m — номер каскада. Для выбора любого из 2^p возможных фазовых состояний фазовращателя достаточно использовать p управляющих сигналов, принимающих условные значения 0 или 1. Тогда, например в двухразрядном фазовращателе, фазовому сдвигу $\Delta\Phi = 0$ соответствует сигнал 00, фазовому сдвигу $\Delta\Phi = 90^\circ$ — управляющий сигнал 01 и т. д.

Переключаемыми элементами большинства полупроводниковых фазовращателей являются *pin*-диоды. Так как диоды обычно работают в двух крайних состояниях, допуски на амплитуду управляющих сигналов нежесткие.

К достоинствам полупроводниковых фазовращателей также относятся малые габариты и низкая масса, большая скорость переключения, простота управляющих устройств, термостабильность.

Преимущества ферритовых фазовращателей перед полупроводниковыми: относительно высокий уровень СВЧ-мощности (так как для управления фазой используется объемная ферритовая сре-

да), меньшие потери (так как ферритовые фазовращатели обычно строят на волноводах, потери в которых меньше, чем в линиях с Т-волной), меньший коэффициент стоячей волны (КСВ).

Ни один из указанных типов фазовращателей не имеет абсолютного преимущества перед другими. Применение того или другого типа зависит от многих факторов: уровня мощности, рабочего диапазона температур, требований к скорости переключений и стабильности. Следует отметить, что высокая стоимость изготовления ФАР, являющаяся следствием большого числа используемых в ней СВЧ-элементов, ограничивает широкое применение систем с фазированными решетками.

В настоящее время разработаны полупроводниковые фазовращатели, работающие при уровне пропускаемой мощности порядка сотен ватт в непрерывном и несколько киловатт в импульсном режиме. При этом потери, например в трехразрядном фазовращателе 10-сантиметрового диапазона, не превышают 1 дБ.

Ферритовые фазовращатели на длинах волн короче 5 см обладают меньшими потерями, чем полупроводниковые. Достоинством ферритовых фазовращателей некоторых типов является внутренняя память, позволяющая управлять фазовыми состояниями путем подачи коротких импульсов. В промежутках между импульсами фазовращатель запоминает фазовый сдвиг, и для его поддержания не затрачивается энергия. Полупроводниковые фазовращатели на *pin*-диодах подобного свойства не имеют, что является их недостатком. Для сохранения требуемых фазовых сдвигов необходимо затрачивать большую мощность, которая может достигать до нескольких киловатт при значительном числе фазовращателей.

В настоящее время разрабатываются фазовращатели на полевых диодах и резистивных затворах, мощность управления которыми составляет единицы ватт. Для переключения этих элементов вполне достаточен уровень напряжения, обеспечиваемый стандартными логическими схемами.

Излучатели ФАР

В ФАР используют диэлектрические стержневые излучатели, полуволновые вибраторы, открытые концы волноводов, диэлектрические стержневые излучатели, спиральные излучатели и т.д.

Выбор типа излучателя определяется диаграммой направленности отдельного элемента, величиной излучаемой мощности, поляризационными характеристиками и широкополосностью. При выборе типа излучателя и построении решетки необходимо учитывать влияние взаимодействия излучающих элементов на характеристики решетки, так как при неудачном построении может возникать эффект «ослепления» фазированной решетки при некоторых углах сканирования, когда решетка практически не излучает и не принимает СВЧ мощности.

Конструкция диэлектрического стержневого излучателя представлена на рис. 3.8. Для уменьшения отражений и соответственно снижения уровня боковых лепестков обычно применяют диэлектрические стержни 1 конической формы (полиэтилен или полистирол). Для создания круговой поляризации внутри волновода 2 и стержня закрепляют пластину 3 из композиционного материала (полиэтилена и двуокиси титана), которую крепят механическим способом — без клея.

Излучателями ФАР могут быть полуволновые объемные вибраторы (рис. 3.9) и вибраторы, выполненные на плоских металлизированных высокочастотных диэлектрических платах, которые располагают на подстилках-экранах. Технология изготовления излучателей ФАР в виде системы полуволновых вибраторов аналогична технологии изготовления печатных плат.

В передающих ФАР сантиметрового диапазона широкое применение нашли рупорные излучатели. Одиночные рупоры, выполненные из латуни или алюминия, собирают в блоки, размеры которых выбирают из условий возможности механической обработки в сборе, транспортирования и монтажа. При сборке рупоров в блоки должны быть выдержаны жесткие допуски ($\sim 0,3$ мм) на шаг между рупорами. После сборки выходные кромки рупоров паяют или сваривают.

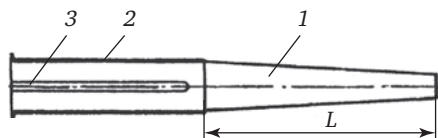


Рис 3.8. Конструктивная схема диэлектрического стержневого излучателя:
1 — стержень; 2 — волновод; 3 — пластина

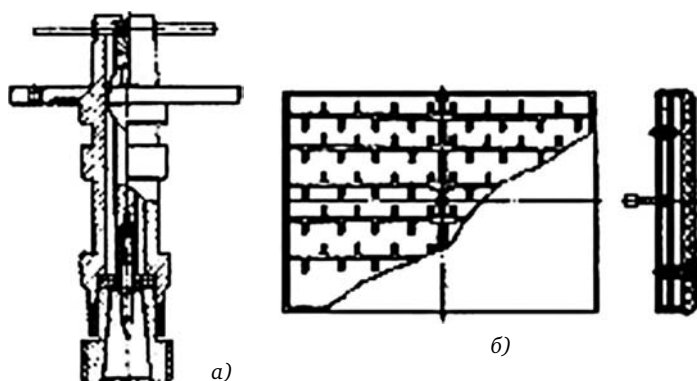


Рис. 3.9. Конструктивная схема вибраторов ФАР:

а — объемный; б — плоский

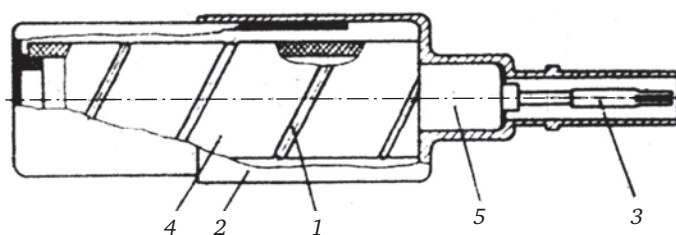


Рис. 3.10. Конструктивная схема спирального излучателя:

1 — проволоочная спираль; 2 — экран; 3 — питающий фидер;

4 — стержень; 5 — переходная муфта

Спиральные излучатели (рис. 3.10) могут быть цилиндрическими или коническими. Один конец спирали присоединяют к внутреннему проводнику фидера, второй остается свободным, экран уменьшает обратное отражение. В режиме осевого излучения длина витка спирали равна длине рабочей волны. Поляризация поля близка к круговой. Для обеспечения устойчивости спираль наматывают на диэлектрические стержни со спиральными канавками. В зависимости от расположения элементов решетки могут быть эквидистантными и неэквидистантными. Эквидистантные решетки предусматривают расположение всех излучателей с равным шагом, близким $\lambda/2$. В неэквидистантных решетках шаг между излучателями имеет различные значения, увеличиваясь от центра решетки. Неэквидистантные решетки применяют в больших ФАР

с целью разрежения излучающих элементов с сохранением параметров решетки.

Антенную решетку, в тракт каждого излучателя или группы излучателей которой включен усилитель, генератор или преобразователь, называют активной фазированной антенной решеткой (АФАР). Для снижения потерь в фидерном тракте активные элементы располагают в непосредственной близости от излучателя. Число активных элементов в активной решетке равно числу секций (или модулей), в которые объединяют несколько излучателей.

3.3. Тепловые режимы ФАР

Охлаждение ФАР

В ФАР лишь несколько процентов подводимой мощности расходуется на полезное преобразование сигнала, а остальная часть выделяется в виде тепловой энергии. Поэтому важным является обеспечение требуемого температурного режима. С этой целью предусматривается охлаждение, что приводит к увеличению массы и габаритов антенны.

Перенос тепла осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением. От наружных поверхностей ФАР до 80 % тепла отводится конвекцией, 10 % — излучением и 10 % — теплопроводностью. В зависимости от плотности теплового потока, т.е. количества тепла, проходящего через единицу поверхности элементов или блоков, например модулей ФАР, применяют те или другие системы охлаждения. При плотности теплового потока $q \leq 0,05 \text{ Вт/см}^2$ специальных мер по охлаждению, как правило, не требуется.

Для теплонагруженных блоков применяют следующие системы охлаждения:

- естественно-воздушные — $q \leq 0,2 \text{ Вт/см}^2$;
- принудительно-воздушные — $q \leq 1 \text{ Вт/см}^2$;
- жидкостные — $q \leq 20 \text{ Вт/см}^2$;
- испарительные — $q \leq 200 \text{ Вт/см}^2$.

Естественно-воздушное охлаждение применяют при относительно невысокой температуре окружающей среды. Важным требованием при таком виде охлаждения является хороший тепловой контакт теплонагруженных элементов с несущими конструкциями. За счет вентиляционных отверстий и жалюзи может отводить-

ся 60...80% тепла, поэтому важно обеспечить необходимое их количество и правильное расположение. Недостатком естественно-воздушного охлаждения является запыленность внутреннего объема ФАР при эксплуатации.

Системы принудительно-воздушного охлаждения по способу подачи воздуха делятся на приточные и вытяжные. В приточных системах воздух, предварительно очищенный в фильтре, подается вентилятором. При этом создается избыточное давление, которое препятствует проникновению запыленного воздуха. Приточные системы позволяют создать достаточный воздушный напор, но не всегда удается избежать аэродинамических теней и застойных зон.

В вытяжных системах нагретый воздух засасывается вентилятором из охлаждаемого прибора и выбрасывается наружу. Вентилятор работает в неблагоприятных условиях, так как через него проходит нагретый воздух. Вытяжная вентиляционная система позволяет существенно улучшить равномерность обтекания воздухом всех элементов конструкции.

В тех случаях, когда не удастся обеспечить требуемое снижение температуры с помощью принудительно-воздушного охлаждения, применяют жидкостное охлаждение. Жидкость, как и воздух, отводит тепло благодаря конвекции, но в отличие от воздуха имеет большую теплопроводность, что существенно повышает эффективность охлаждения.

Существует несколько типов систем жидкостного охлаждения, отличающихся физикой процессов, происходящих в жидкости, и конструктивным решением.

Наиболее простым способом отвода тепла является отвод с помощью жидкости, протекающей по каналам, стенки которых имеют хороший тепловой контакт с теплонагруженными элементами. Возможно также охлаждение без специальных каналов. В этом случае жидкость заполняет все пространства, где размещены элементы конструкции.

Наиболее доступной и дешевой охлаждающей жидкостью является вода. В замкнутых системах, особенно при работе в зимних условиях, применяют антифризы на основе этиленгликоля, не замерзающие при отрицательных температурах.

Применяемая для охлаждения жидкость должна быть химиче-

ски инертной к материалам, из которых выполнены охлаждающие поверхности.

Наибольший эффект охлаждения достигается в том случае, когда используется способность жидкости интенсивно отводить тепло при кипении. Такой способ называется испарительным. Температура охлаждаемого тела остается близкой к точке кипения жидкости, если охлаждающая жидкость имеет высокую удельную теплоемкость и отвод тепла происходит за счет парообразования.

Охлаждающая поверхность не перегреется до тех пор, пока она не будет рассеивать так много тепла, что между ней и жидкостью образуется теплоизолирующая прослойка пара.

Для обеспечения нормального режима охлаждения жидкость должна хорошо смачивать поверхность, иметь малую вязкость и низкую температуру загустения. Процесс кипения должен протекать без образования отложений на охлаждаемой поверхности продуктов термического разложения жидкости и содержащихся в ней солей. Широкое применение для этих целей нашли химически инертные и нетоксичные фреоновые жидкости, имеющие низкую температуру затвердевания, невысокую температуру кипения (порядка $+25^{\circ}\text{C}$), удовлетворительную теплоемкость и теплопроводность.

Испарительные системы охлаждения имеют следующие преимущества:

- возможность отвода больших мощностей энергии;
- малые габариты и небольшое количество теплоносителя;
- постоянство рабочей температуры в широком диапазоне мощностей;
- независимость от температуры окружающей среды.

Недостатком является утечка пара вследствие значительного избыточного давления.

Разновидностью испарительных систем охлаждения является охлаждение с помощью испарительных трубок. Испарительная трубка (рис. 3.11) представляет собой полый тонкостенный металлический стержень, внутренние стенки которого покрыты пористым материалом, способным насыщаться рабочей жидкостью (капиллярный эффект).

При нагреве одного конца трубки рабочая жидкость начинает испаряться, пар по внутреннему каналу перемещается к другому,

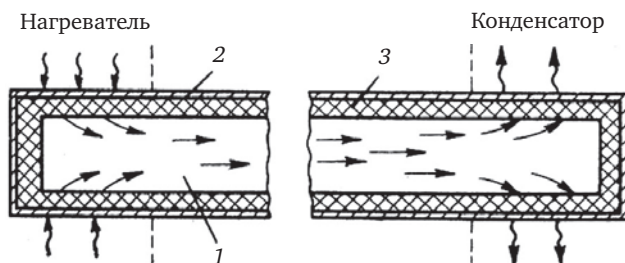


Рис. 3.11. Конструктивная схема испарительной трубки:

1 — охлаждающая жидкость; 2 — полый стержень; 3 — пористый материал

холодному концу, где происходит его конденсация и отдача тепла. Затем это тепло передается на радиатор или стенки корпуса. Конденсированная жидкость впитывается в пористый материал и по капиллярам возвращается к горячему концу.

Эффективность работы испарительной трубки очень высока. Например, трубка длиной 60 см и диаметром 13 мм при массе 350 г отводит тепловой поток мощностью до 200 Вт (для передачи такой мощности требуется медный стержень сечением 7×7 см массой 25 кг).

Системы отвода тепла ФАР

В зависимости от плотности теплового потока, т.е. теплового потока, проходящего через единицу поверхности элементов, блоков и антенного полотна, применяют те или другие способы охлаждения. Системы отвода тепла предусматривают охлаждение теплонагруженных элементов; блока (субмодуля); модуля; АФАР.

Для мобильных станций требуется организация замкнутой системы охлаждения. В тех случаях, когда из небольшого пространства необходимо отвести тепло в окружающую среду, а поверхность теплового контакта ограничена, используются двухступенчатые системы охлаждения. На первой ступени тепловой поток от теплонагруженных элементов или блоков выводится из модулей во внутренние полости ФАР (локальное охлаждение), на второй — тепловой поток выводится в окружающую среду. На первой ступени применяют жидкостные системы с использованием жидкости с высокой теплоемкостью и температуропроводностью. На второй ступени, как правило, используют воздушное или

жидкостное охлаждение. В условиях ограниченного пространства (на уровне субмодуля или модуля) отвод тепла может осуществляться с помощью жидкости, протекающей по каналам, стенки которых должны иметь хороший тепловой контакт с теплонагруженными элементами. При этом охлаждающая жидкость должна принудительно циркулировать между теплонагруженной зоной и холодильником. Для повышения температурного потенциала в первой ступени целесообразно использовать термоэлектрические модули.

Термоэлектричество — это явление прямого преобразования теплоты в электричество в твердых или жидких проводниках: эффект Зеебека, Пельтье и Томсона.

Основным технологическим узлом всех термоэлектрических охлаждающих устройств является термоэлектрическая батарея, набранная из последовательно соединенных термоэлементов. Так как металлические проводники обладают слабыми термоэлектрическими свойствами, термоэлементы выполняют из полупроводников, причем одна из ветвей термоэлемента должна состоять из дырочного (p -тип), а другая — из электронного (n -тип) полупроводника. Если выбрать такое направление тока, при котором на контактах, расположенных внутри устройства, тепло будет поглощаться, а на наружных контактах — выделяться в окружающее пространство (эффект Пельтье), то температура внутри будет понижаться, а окружающее пространство нагреваться. Современные термоэлектрические охлаждающие устройства обеспечивают холодопроизводительность, как правило, не более 100 Вт.

Модуль Пельтье представляет собой термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно соединенных полупроводников p - и n -типа, образующих p - n - и n - p -переходы (рис. 3.12). Каждый из переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля: один радиатор работает как холодильник, другой — нагревается и служит для отвода тепла. Типовой модуль обеспечивает значительный перепад температур (несколько десятков градусов). Для увеличения разности температур применяют каскадное включение термоэлектрических модулей Пельтье.



Рис. 3.12. Схема термоэлектрического модуля охлаждения на основе эффекта Пельтье

Использование модулей Пельтье в активных системах охлаждения позволяет существенно повысить их эффективность по сравнению с системами охлаждения на основе традиционных радиаторов и вентиляторов.

Модули Пельтье, выделяющие в процессе работы большое количество тепла, требуют наличия в составе систем охлаждения соответствующих радиаторов и вентиляторов, способных эффективно отводить избыточное тепло от охлаждающих модулей. Следует отметить, что термоэлектрические модули имеют относительно низкий КПД.

Весьма перспективным может быть использование термоэлектрических устройств в качестве «интенсификатора теплопередачи». В тех случаях, когда из какого-либо небольшого пространства необходимо отвести теплоту в окружающую среду, а поверхность теплового контакта ограничена, располагаемые на поверхности термоэлектрические батареи могут значительно интенсифицировать процесс теплопередачи. Сравнительно небольшой расход электроэнергии способен существенно увеличить удельный тепловой поток. Интенсифицировать теплопередачу возможно и без

затрат электроэнергии. В этом случае необходимо замкнуть термобатарейку. Разность температур приведет к появлению эффекта Зеебека и обеспечит питание термоэлектрической батареи. С помощью термоэлектрических устройств можно изолировать одну из теплообменивающихся сред, т. е. использовать ее в качестве совершенной тепловой изоляции.

Наиболее эффективным и перспективным способом локального охлаждения являются жидкостные капиллярные системы, которые позволяют обеспечить охлаждение непосредственно теплонагруженных элементов.

В последнее время отмечается повышенный интерес к тепловым трубам, в которых используется принцип испарительного охлаждения, а перенос теплоты происходит в результате циркуляции теплоносителя по замкнутому двухфазному контуру с капиллярным возвратом теплоносителя в зону испарения.

Особый интерес представляет применение двухфазных систем терморегулирования с капиллярными насосами при воздействии на них различных внешних (ускорения — «повышенная и пониженная гравитация», вибрации) и внутренних (градиенты температуры, поверхностного натяжения, геометрической кривизны) динамических факторов.

Конструкция системы охлаждения представляет собой герметичный корпус (например, параллелепипед), выполненный из металла с высокой теплопроводностью (например из меди). Корпус в средней части разделен продольной перегородкой. Образованные таким образом два внутренних канала, связанные между собой в зонах нагрева и охлаждения, обеспечивают непрерывную циркуляцию хладагента. При создании такой системы охлаждения важное, если не решающее, значение имеет выбор насоса или разработка специального насоса.

Расчет тепловых режимов

Расчет тепловых режимов заключается в составлении теплового баланса для выбранной системы охлаждения.

Количество тепла, отводимое конвекцией, определяется по формуле

$$Q_k = a_k(t_1 - t_b)F_1,$$

где a_k — конвективный коэффициент теплоотдачи; t_1, t_b — температура нагретого тела и воздуха (жидкости) соответственно; F_1 — площадь поверхности конвективной теплоотдачи.

Количество тепла, повышающее теплосодержание воздуха:

$$Q = Lc(t_b - t_c),$$

где L — расход воздуха, кг/с; c — удельная теплоемкость, Вт·с/(кг·град); t_c — температура окружающей среды;

Количество тепла, отводимое лучеиспусканием от нагретого тела с температурой t_2 к холодному с температурой t_1 :

$$Q_{\text{и}} = C_0 \varepsilon_{\text{п}} \varphi_{1,2} [(t_1/100)^4 - (t_2/100)^4] F_{\text{и}},$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·град⁴) — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 10^8 \sigma_0$; $\varepsilon_{\text{п}}$ — приведенная степень черноты; $\varphi_{1,2}$ — коэффициент взаимной облученности тел.

Количество тепла, отводимое теплопроводностью (кондукцией) через стенку толщиной h , составляет:

$$Q_c = \frac{t_1 - t_2}{R} F_c,$$

где t_1 и t_2 — температура нагретой и холодной поверхностей стенки; $R = h/\lambda$ — тепловое сопротивление стенки; λ — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·град). Важное значение при теплообмене кондукцией имеет сопротивление тепловых контактов в соединительных узлах. Величина теплового сопротивления контакта в этом случае может быть определена по формуле Ю.П. Шлыкова и Е.А. Ганина:

$$\frac{1}{R} = \frac{2\lambda_c}{h_{\text{ср1}} + h_{\text{ср2}}} + 2,44 \cdot 10^4 \frac{N \bar{\lambda}_{\text{м}}}{3\sigma_{\text{в}}},$$

где λ_c — коэффициент теплопроводности среды, заполняющей промежутки между микрошероховатостями; $h_{\text{ср1}}$ и $h_{\text{ср2}}$ — высоты микрошероховатости контактирующих поверхностей:

$$\bar{\lambda}_{\text{м}} = \frac{2\lambda_{\text{м1}}\lambda_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м1}} + \lambda_{\text{м2}}},$$

где λ_{m1} и λ_{m2} — коэффициенты теплопроводности материалов контактирующей пары; σ_b — временное сопротивление наименее пластичного материала из контактирующей пары, Н/м²; N — удельное усилие, сжимающее контактирующую пару, Н/м².

Из формулы следует, что уменьшение контактного теплового сопротивления может быть произведено за счет применения материала с большей теплопроводностью, выбора более пластичных материалов или гальванических покрытий, уменьшения шероховатости соединяемых поверхностей, увеличения давления.

Расчет нагрузок и эксплуатационно-метеорологических воздействий на стационарные антенны

В процессе эксплуатации антенные устройства испытывают климатические и геофизические воздействия, к которым относятся: ветер, гололед, колебания температуры воздуха, солнечная радиация, а также сейсмические и другие динамические нагрузки.

Одним из доминирующих факторов, принимаемых во внимание при расчете антенн на прочность и жесткость, являются ветровые нагрузки (сила, характер и преимущественное направление ветра, определяемые климатическими условиями и рельефом местности).

4.1. Общие сведения о ветре

При проектировании антенных сооружений необходимы данные о параметрах и характеристиках ветра — законах распространения, интенсивности, порывистости, частоте появления и др., поскольку доминирующая над остальными ветровая нагрузка определяет во многом прочность, устойчивость, деформативность и надежность конструкций. Возникающая при ветре вибрация проводов, стальных канатов, башен, трубчатых мачт и элементов антенн приводит к преждевременному их разрушению, если она не подавлена.

Под воздействием разности атмосферного давления происходит движение воздуха. Воздух тормозится силой трения, отклоняется вращением Земли и центробежной силой. Влияние силы трения сильнее сказывается в нижних слоях атмосферы (сотни метров) — у поверхности земли. Вследствие турбулентности атмосферы скорость воздушного потока и его направление постоянно изменяются. Осредненную величину скорости ветра и его скорости в порывах

определяют стационарными приборами (анемометрами), в свободной атмосфере на больших высотах — с помощью радиозондов, шаропилотных наблюдений. Скорость ветра измеряется в метрах в секунду, километрах в час или милях в час.

С приближением к поверхности земли влияние силы трения возрастает, скорость ветра снижается до нуля, пульсация скорости растет. На большой высоте (многие сотни метров) движение воздуха равномерное; скорость ветра направлена по изобаре, имеющей вид эллипса или окружности.

С турбулентностью атмосферы связана порывистость ветра, которую определяют с помощью среднеквадратичных значений пульсации продольной составляющей скорости ветра или коэффициента порывистости, равного отношению скорости в порыве к средней, т. е. за больший промежуток времени.

Для выяснения действия ветра на сооружения необходимо знать его наибольшую скорость, направление, порывистость, продолжительность, частоту появления ветра различной скорости, преимущественное направление сильных ветров, а в некоторых случаях и другие составляющие — температуру и влажность воздуха, его плотность, включая пылевые частицы.

Для измерения скорости ветра применяют чашечные или крыльчатые анемометры. В последнее время используют измерительные приборы, в которых приемником служит более чувствительный воздушный винт — анеморумбометр М-63, анеморумбограф М-64 и др.

Направление ветра определяют по шкалам в горизонтальной (азимутальной) плоскости. Для этого круг разбивают на 8 или 16 румбов. Отсчет производится по часовой стрелке; за ноль азимута принимается север. Ветер, дующий под углом 45° , называют северо-восточным, под углом 225° — юго-западным. Для характеристики ветра по направлениям строят график — «розу ветров». Обычно ограничиваются восемью главными румбами, т. е. градацией направлений ветра через 45° .

Для измерения скорости ветра на различных высотах над поверхностью земли используют шары-пилоты, реже — аэростаты, а также радиомачты и телевизионные башни.

Для определения характеристик воздушных струйных течений (ветровых потоков) необходимо учитывать следующие данные:

- статистические закономерности распределения воздушных потоков у поверхности земли;
- вертикальные профили воздушных потоков;
- порывистость ветра.

Все перечисленные характеристики связаны как с глобальными атмосферными процессами, так и с местными климатическими, рельефными и другими особенностями.

Статистические закономерности распределения воздушных потоков у поверхности земли

Рассматривая временной режим скорости ветра $u = u(t)$ как случайную функцию времени, определяют, как часто ($\bar{n}_a$) она достигает или превышает некоторое критическое значение a , наблюдаются ли дни с $u > a$ в виде отдельных случаев или проходят сериями, какова средняя длительность этих серий $\bar{\tau}_a$ и каково общее число дней с $u > a$ в течение заданного отрезка времени (месяц, год и т.д.).

Решение указанной задачи сводится к известной в теории случайных функций задаче о выбросах. Следовательно, вероятность выброса ординаты функции $u = u(t)$ за интересующее нас значение a в интервале времени dt :

$$P(t) = u(t) < a; u(t+dt) > a.$$

Полагая, что случайная функция $u(t)$ дифференцируема, а dt мало с точностью до бесконечно малых второго порядка, можно записать:

$$u(t+dt) = u(t) + \dot{u}(t)dt.$$

Так как $u(t) > 0$, то

$$a - u(t) dt < a.$$

Для вычисления вероятности неравенства следует ввести закон распределения ординаты случайной функции и ее производной по времени ($f(u, \dot{u}/t)$). С учетом этого

$$P(t) = \int_0^a \int_{a-udt}^a f(u, \dot{u}/t) dn dt v. \quad (4.1)$$

Внутренний интеграл вычисляется с использованием теоремы о среднем:

$$\int_{a=vd}^{\bar{a}} f(u, \dot{u}/t) du = v f(u, \dot{u}/t). \quad (4.2)$$

Подставляя (4.2.) в (4.1.), получим:

$$P(t) = dt \int_0^a f(a, \dot{u}/t) \dot{u} d\dot{u}. \quad (4.3)$$

Разделив выражение (4.3.) на dt , определим плотность вероятности выброса $u(t)$ за уровень в момент времени t за единицу времени:

$$P(a/t) = \int_0^a f(a, \dot{u}/t) \dot{u} d\dot{u}. \quad (4.4)$$

Таким же образом можно подсчитать плотность вероятности пересечения случайной функцией уровня сверху вниз:

$$\dot{P}(a/t) = - \int_{-\infty}^0 f(a, \dot{u}/t) \dot{u} dv. \quad (4.5)$$

Из (4.4) и (4.5) определяют следующие характеристики: среднее время пребывания случайной функции $u(t)$ выше уровня a за промежуток времени T :

$$\bar{t}_a = \int_0^T \int_0^\infty f(u/t) du dt; \quad (4.6)$$

среднее число выбросов за уровень a , имевших место за промежуток времени T :

$$\bar{n}_a = \int_0^T \int_0^\infty v f(a, \dot{u}/t) d\dot{u} dt; \quad (4.7)$$

средняя продолжительность выброса:

$$\bar{\tau}_a = \bar{t}_a / \bar{n}_a. \quad (4.8)$$

Анализ долголетних наблюдений за распределением выбранного значения скорости ветра свидетельствует об отсутствии каких-

либо детерминированных закономерностей, что дает возможность считать процесс стационарным. Это позволяет записать формулы (4.6)—(4.8) следующим образом:

$$\bar{t}_a = T \int_0^{\infty} f(u) du; \quad (4.9)$$

$$n_a = T \int_0^{\infty} \dot{u} f(a, \dot{u}) d\dot{u}; \quad (4.10)$$

$$\bar{\tau}_a = \frac{\int_0^{\infty} f(u) du}{T \int_0^{\infty} \dot{u} f(a, \dot{u}) d\dot{u}}. \quad (4.11)$$

Для получения из (4.9)—(4.11) расчетных зависимостей необходимо иметь законы распределения u и $\dot{u}$, которые определяются статистическими методами.

Функция распределения ветра имеет вид:

$$f(u) = \frac{\gamma}{\delta} \left(\frac{u}{\delta} \right)^{\gamma-1} e^{-(u/\delta)^\gamma}, \quad (4.12)$$

где γ и δ — параметры, определяемые по наблюдениям.

Формула (4.12) хорошо описывает одномодальный закон распределения ветра.

Полагая, что v имеет нормальный закон распределения, u — в соответствии с (4.12), а скорость изменения ординаты случайной функции и сами ординаты — некоррелированные случайные величины, получим

$$f(u, v) = \frac{\gamma}{\delta} \left(\frac{u}{\delta} \right)^{\gamma-1} e^{-(u/\delta)^\gamma} \frac{1}{\delta_v \sqrt{2\pi}} e^{-\dot{u}^2/2\sigma_v^2}, \quad (4.13)$$

где

$$\sigma_v^2 = - \frac{d^2}{dt^2} K_u(\tau) \Big|_{\tau=0}. \quad (4.14)$$

Так как процесс стационарен, $v(t) = 0$, автокорреляционная функция $K_u(\tau)$ определяется статистическим методом (по данным наблюдений). Обработка данных произвольно выбранных метеостанций, соответствующих III и IV ветровым районам, показывает, что указанная функция приближенно может быть аппроксимирована аналитическим выражением типа

$$K_u(\tau) = \sigma_u^2 e^{\gamma \cos \alpha(\tau)} \left[\cos \beta(\tau) + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta(\tau) \right]. \quad (4.15)$$

Аппроксимация проводилась методом графического подбора функции распределения. Подставив (4.13) с учетом (4.15) в (4.9), (4.10) и (4.11), получим:

$$\begin{aligned} \bar{t}_a &= T e^{-(a/\delta)^\gamma}; \\ \bar{n}_a &= T \sqrt{\frac{\sigma_u^2 (\alpha^2 + \beta^2)}{2\pi}} \frac{\gamma}{\delta} \left(\frac{a}{\delta}\right)^{\gamma-1} e^{-(a/\delta)^\gamma}; \\ \bar{\tau}_a &= \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_u^2 (\alpha^2 + \beta^2)}{2\pi}} \frac{\gamma}{\delta} \left(\frac{a}{\delta}\right)^{\gamma-1}}. \end{aligned}$$

По полученным зависимостям может быть рассчитано среднее время пребывания функции $u(t)$ выше уровня a , а также (при необходимости) среднее число выбросов n_a и средняя продолжительность выброса τ_a . Отсюда может быть определено среднее время пребывания функции $u(t)$ ниже уровня a и вероятность этого:

$$\bar{t} = T - \bar{t}_a = T \left(1 - \frac{\bar{t}_a}{T} \right);$$

$$f = \frac{\bar{t}}{T} = 1 - \frac{\bar{t}_a}{T}.$$

Последняя функция определяет эффективность решения экологических проблем, задач энергосбережения и энергобезопасности, связанных с ветровыми процессами.

Вертикальные профили воздушных потоков

Скорость ветра не остается неизменной по высоте. Объясняется это влиянием трения воздуха о подстилающую поверхность. Чем выше расположен рассматриваемый объект, тем меньше сказывается трение и тем больше — скорость ветра. Изменение силы ветра по высоте определяется степенью шероховатости подстилающей поверхности и интенсивностью турбулентного обмена. Чем больше шероховатость поверхности, тем больше трение и тем сильнее изменяется ветер с высотой.

Интенсивность турбулентного обмена зависит от стратификации атмосферы, в частности, от распределения температуры с высотой и характера движения воздушных масс. Интенсивный обмен по вертикали способствует выравниванию всех свойств атмосферы, поэтому при неустойчивой стратификации скорость ветра на высоте выравнивается и разница между ветром в приземном слое и на больших высотах уменьшается. Устойчивая стратификация затрудняет вертикальный обмен и для нее характерно более резкое изменение скорости ветра с высотой. При сильном ветре происходит перемешивание верхних и нижних слоев воздуха и распределение скорости ветра примерно соответствует неустойчивой стратификации.

Изменения скорости ветра с высотой равны

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{h_1^{1-k} - z_0^{1-k}}{h_2^{1-k} - z_0^{1-k}},$$

где u_1 и u_2 — скорости ветра на высотах h_1 и h_2 ; k — коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы.

Величина z_0 характеризует влияние шероховатости подстилающей поверхности и математически соответствует высоте, на которой скорость ветра равна нулю. Обычно ее называют параметром шероховатости.

При равновесном состоянии атмосферы, характерном при скорости ветра более 8...10 м/с, $k = 1$ и предыдущая формула переходит в известную логарифмическую зависимость:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{\lg(h_1/z_0)}{\lg(h_2/z_0)}.$$

Эта зависимость соответствует приложению теории Прандтля для движения несжимаемой жидкости в пограничном слое, которое определяется только силой трения и влажностью. Многочисленные измерения подтверждают возможность использования логарифмической зависимости для изменения скорости ветра с высотой за исключением инверсий и случаев, соответствующих сверхадиабатическому состоянию, которое не представляет интереса для сильных ветров.

Параметры шероховатости различных подстилающих поверхностей приведены в табл. 4.1.

Пересеченный рельеф местности подобно любому препятствию на пути воздушного потока оказывает непосредственное влияние на скорость ветра. Происходящие при этом явления подчиняются общим законам аэродинамики, причем изменения скорости ветра могут быть очень значительными, в силу чего должно быть учтено влияние микрорельефа и высотных отметок на скорость ветра.

Известно, что при встрече с различными неровностями земной поверхности воздушные течения деформируются: наблюдается местное усиление или затухание скорости ветра, изменение его направления и т.д.

4.1. Шероховатость различных подстилающих поверхностей

Подстилающая поверхность	Шероховатость, см
Снежный покров	0,5
Черный пар	1,0
Растительный покров высотой, см	
0...5	1,0
6...10	2,0
11...20	3,0
21...50	4,0
51...130	5,0
Густой высокий кустарник	10...20
Лес, город	100...200

С высотой скорость ветра растет тем быстрее, чем быстрее затухают приземные возмущения, наибольшее влияние из которых оказывает тормозящее действие поверхности земли. Профиль скорости ветра зависит от шероховатости поверхности: в городах с высокими

строениями или в горах нарастание скорости ветра с высотой происходит медленнее, чем над морем или ровной травянистой поверхностью земли. Особое значение имеет правильный учет особенностей микрорельефа или сильно пересеченной местности.

Помимо рельефа и высотных отметок, на скорость ветра существенно влияют леса и возвышенности большой протяженности. Внутри сомкнутого древостоя скорость ветра по высоте мало изменяется. Выше этого слоя наблюдается сравнительно быстрое возрастание скорости ветра. Для ее определения можно использовать логарифмический закон распределения скорости ветра с высотой, принимая более высокие параметры шероховатости. Все эти данные касаются слабых ветров, однако и при больших их скоростях характер явления будет качественно аналогичным.

При оценке влияния вертикального профиля воздушного потока на высотные строения необходимо также учитывать плотность воздуха, которая также изменяется по высоте. Эта зависимость может быть представлена в следующем виде:

$$\rho = \rho_1 \exp\left(-\frac{h-h_1}{H}\right), \quad (4.16)$$

где $H = R_0 T / (g_0 M)$ — высота однородной атмосферы, равная высоте некоторого фиктивного столба, плотность которого всюду равна ρ , и который на высоте $(h-h_1)$ имеет то же давление, что и рассматриваемая атмосфера; R_0 — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура воздуха; g_0 — ускорение силы тяжести; M — молекулярная масса воздуха.

Расчеты по формуле (4.16) показывают, что плотность атмосферы до высоты 300...400 м изменяется мало, поэтому может быть принята равной плотности на нулевой отметке $\rho = 1,225 \cdot 10^{-3}$ г/см³. На больших высотах плотность существенно уменьшается и, например на отметке 5 км, равна $0,74 \cdot 10^{-3}$ г/см.

Порывистость ветра

Движения воздуха в атмосфере всегда турбулентны. Ветер, даже слабый, не бывает ровным: обычно его скорость пульсирует. Если значения средних скоростей ветра, связанных с географическими координатами и высотой, определяют общий характер движения воздушных потоков, то пульсации ветра оказывают суще-

ственное влияние на характер воздушных потоков у поверхности земли.

Известно, что пульсации вызваны торможением частиц воздуха о поверхность земли, конвекционными токами между различно нагретыми слоями, трением между слоями, движущимися с различной скоростью. В городе, особенно со зданиями и сооружениями большой высоты, турбулентность велика, возможны мощные вихри, местные усиления скорости, застойные зоны. Изменчивость скорости ветра характеризуется коэффициентом порывистости, или пульсации — отношение среднеквадратичной скорости в порывах к средней скорости. Коэффициент порывистости убывает с увеличением средней скорости ветра. Период пульсаций скорости ветра составляет от нескольких минут при большом значении скорости до одной секунды — при малом. С увеличением высоты над поверхностью земли порывистость убывает; абсолютные значения пульсации могут расти или убывать.

Порывистость ветра определяется из длительных наблюдений мгновенной скорости ветра (осредненной за 2...5 с) на различных высотах в характерных по шероховатости земли районах.

При использовании данных о средней скорости ветра и скорости в порывах необходимо оценить время ее осреднения, от которого зависит коэффициент порывистости.

Время осреднения	1 ч	5 мин	1 мин	30 с	10 с	5с
Скорость, м/с	26	27,3	31,3	35,8	41,1	42,5
Коэффициент порывистости.....	1,0	1,05	1,2	1,38	1,58	1,63

Турбулентность неоднородна. Интенсивность пульсации с удалением от земли уменьшается тем быстрее, чем больше шероховатость поверхности земли. Пульсации скорости ветра рассматриваются как стационарный случайный процесс, который может быть описан с привлечением теории случайных функций. В первом приближении распределение горизонтальной и продольной компоненты скорости ветра принимают нормальными, расчетные ординаты получают умножением среднеквадратичных отклонений скорости на числовой множитель, который принимают обычно равным 2,5 или 3,0, что соответствует вероятности 0,01 и 0,0027 соответственно.

Скорость ветра в порыве, т.е. с учетом пульсационной составляющей u' ,

$$u = \bar{u} + u',$$

где $\bar{u}$ — средняя скорость ветра.

Разделение ветровой нагрузки на статическую и динамическую составляющие не позволяет ограничиваться только коэффициентами пульсации. При расчетах применяются имеют эмпирические спектры продольной компоненты скорости ветра, в которых учитывается и вид местности.

Эмпирический спектр имеет вид:

$$S_{v'}(n) = 2k_0 \bar{u}^2 u'^2 / n(1 + u'^2)^{4/3},$$

где $u = 1200n/\bar{u}$; k_0 — коэффициент сопротивления подстилающей поверхности, принимаемый для вида местности А, Б и В — 0,005, 0,01 и 0,04; соответственно равнинный, сельский, городской; $\bar{u}$ — средняя часовая скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли; n — частота пульсаций скорости ветра.

При принятом энергетическом спектре интенсивность турбулентности на высоте z составляет

$$\gamma_T(z) = 2,45 k_0^{1/2} (z/10)^{-\alpha},$$

где α — показатель степени в формуле возрастания скорости ветра с высотой по степенному закону берется в зависимости от вида местности.

Принимая пульсацию продольной компоненты скорости полностью коррелированной по высоте, определяют динамическую составляющую ветровой нагрузки при учете высших форм собственных колебаний сооружения. Коэффициент пульсации

$$m_k = k_\tau (z_k/10)^{-\alpha},$$

где $\alpha = 0,16$ для открытой местности (вида А); 0,22 — для лесной и сельской (Б); 0,33 — для городской (В), а $k_\tau = 0,6$; 0,88 и 1,75 соответственно виду местности.

4.2. Расчет ветровой нагрузки

На основе многолетних регулярных измерений интенсивности и направления ветров, а также повторяемости ветров различной силы выделено семь районов.

Как уже отмечалось, ветер редко дует с постоянной силой. Эта особенность связана с трением между слоями и конвекционными потоками, приводящими к пульсации скорости ветра. Таким образом, ветер оказывает на сооружения статическое и динамическое воздействия. Причем значение динамической нагрузки существенно зависит от свойств самой конструкции: геометрии сооружения, жесткости конструкции, рассеяния энергии при колебаниях, что в совокупности определяет реакцию конструкции на порывистый характер ветровой нагрузки.

Учет всех этих факторов лежит в основе методики определения ветровых нагрузок на сооружение. При расчете сооружений с периодом собственных колебаний $T_{01} \leq 0,25$ с учитывается только статическое действие ветровой нагрузки. В других случаях статическая и динамическая составляющие определяются отдельно. Нормативные значения статической составляющей ветровой нагрузки определяются по формуле

$$q_h^c = q_0 k_h c_x,$$

где q_0 — скоростной напор ветра; k_h — коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора по высоте; c_x — аэродинамический коэффициент лобового сопротивления.

Скоростной напор ветра q_0 принимается по карте районирования. В табл. 4.2 приведены значения скоростных напоров по ветровым районам и соответствующие скорости ветра, замеренные на высоте 10 м, полученные при двухминутном осреднении и пятилетней обеспеченности, т.е. превышаемые не более одного раза в 5 лет.

4.2. Значения скоростных напоров по ветровым районам

Районы России по интенсивности ветра	I	II	III	IV	V	VI	VII
q , Па	270	350	450	550	700	850	1000
u , м/с	21	24	27	30	34	37	40

Коэффициент k_h определяется по табл. 4.3 в соответствии с характеристикой подстилающей поверхности.

Расчетная ветровая нагрузка на сооружение принимается с учетом коэффициента перегрузки $n_{п}$, учитывающего повышение нор-

мативного скоростного напора, когда срок эксплуатации сооружения превышает 5 лет:

$$q_p^c = n_n q_n^c.$$

Значение коэффициента перегрузки зависит от срока эксплуатации и класса капитальности сооружения.

4.3. Значения коэффициентов высоты и пульсации

Высота над поверхностью земли, м		10	20	40	60	100	200	350 и более
Коэффициент высоты	K_A	1,0	1,25	1,55	1,75	2,1	2,6	3,1
	K_B	0,65	0,9	1,2	1,45	1,8	2,45	3,1
	K_C	0,3	0,5	0,75	1,0	1,4	2,20	3,1
Коэффициент пульсации скоростного напора	m_A	0,6	0,55	0,48	0,46	0,42	0,38	0,35
	m_B	0,88	0,75	0,65	0,60	0,54	0,46	0,40
	m_C	1,75	1,40	1,10	0,97	0,82	—	—

Примечание. Индексы у коэффициентов k и m указывают вид местности:

А — степи, лесостепи, пустыни, открытые побережья морей, озер, водохранилищ;

Б — города с окраинами, застроенными невысокими зданиями, лесные массивы и др. ;

В — города современной застройки — со зданиями высотой 100...120 м.

Динамическое воздействие ветровой нагрузки (связано с пульсирующим характером ветровой нагрузки) вызывает колебания сооружения в направлении ветрового потока.

Для расчета динамической составляющей ветровой нагрузки сооружение представляется в виде системы с конечным числом степеней свободы. Нормативное значение составляющей ветровой нагрузки определяется, как и в других случаях вынужденных колебаний системы, в виде инерционной силы. Если система одномассовая (например мачта с установленным на ее вершине тяжелым оборудованием, когда массой мачты можно пренебречь), то величина инерционной силы определяется по формуле

$$Q_H^d = Q_H^c m_k \xi,$$

где m_k — коэффициент пульсации скорости ветра, определяемый как отношение амплитуды колебаний скоростного напора к его средней величине — статической составляющей.

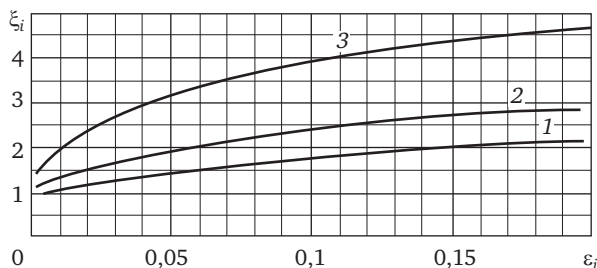


Рис. 4.1. Коэффициент динамичности в зависимости от параметра ε :

1 — для железобетонных и каменных сооружений, а также для зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций ($\delta = 0,3$); 2 — для стальных башен, аппаратов колонного типа, в том числе на железобетонном постаменте ($\delta = 0,15$); 3 — для стальных сооружений и конструкций при совместном учете резонансных колебаний и динамической составляющей ветровой нагрузки в плоскости потока ($\delta = 0,05$)

Коэффициент динамичности ξ определяет реакцию сооружения на пульсацию ветра. Он зависит от периода собственных колебаний, логарифмического декремента колебаний и частоты порывов ветра. Эта зависимость определяется параметром ε , который рассчитывается по следующей формуле:

$$\varepsilon = T_{0i} u / 1200,$$

где T_{0i} — период собственных колебаний, соответствующий i -й форме; $u = 4\sqrt{n_{\Pi}} q_0$ — расчетная скорость ветра, м/с.

Значение коэффициента динамичности ξ в зависимости от параметра ε определяется по графикам, приведенным на рис. 4.1.

Многомассовая система имеет несколько форм колебаний, соответствующих числу степеней свободы. При этом не только первая, но и несколько других могут иметь период собственных колебаний более 0,25 с. В этом случае динамическая составляющая ветровой нагрузки для j -й массы при i -й форме колебаний определяется по зависимости

$$Q_{nji}^d = M_j \xi_{ji} \eta_{ij} \varkappa,$$

где M_j — j -я масса; η_{ij} — приведенное ускорение j -й массы при i -й форме колебаний; $\varkappa$ — коэффициент, учитывающий пространственную корреляцию пульсации скорости ветра по высоте и фронту сооружения. Этот коэффициент принимается по табл. 4.4.

Приведенное ускорение определяется по следующей зависимости

$$\eta_{ij} = \frac{\alpha_{ij} \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} Q_k^c m_k}{\sum_{k=1}^n \alpha_{ik}^2 M_k},$$

где α_{ik} — коэффициенты формы колебаний.

При расчете сооружений усилия и перемещения при воздействии ветровой нагрузки определяются отдельно для каждой формы колебаний.

4.4. Коэффициент пространственной корреляции пульсации скорости ветра

Параметр ε	Коэффициенты корреляции $\varkappa$ для сооружений различной высоты или антенн длиной, равной половине ее реальной длины, м					
	До 45	60	120	150	300	450 и более
0,05	0,70	0,65	0,60	0,55	0,45	0,35
0,1	—	0,75	0,65	0,60	0,50	0,4
0,2	—	—	0,75	0,70	0,60	0,5

Суммарное усилие или перемещение

$$X_j^{\Sigma} = X_j^c + \sqrt{\sum_{i=1}^s (X_{ij}^d)^2},$$

где X — изгибающий или крутящий момент, поперечная или продольная сила, перемещение, соответственно статическая и динамические составляющие.

Ветровой резонанс

При воздействии потока ветра на сооружение возникает динамическое возбуждение сооружения, проявляющееся в колебании тела в направлении, перпендикулярном потоку (вихревое возбуждение, установленное Струхалем и Рэлеем). Это явление характерно для колебаний дымовых труб, радиомачт, телевизионных опор и им подобных сооружений цилиндрической формы.

Явлению ветрового резонанса уделяют большое внимание, так как это явление возникает при сравнительно небольших скоростях, т.е. эксплуатационных — 5...10 м/с. Частые вибрации приводят к усталостным явлениям, что в некоторых случаях приводит к пол-

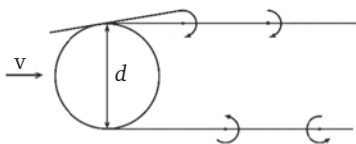


Рис. 4.2. Схема вихревого следа в виде дорожки Кармана

ному выходу сооружения из строя.

Физическая сущность явления ветрового резонанса заключается в следующем. При обтекании потоком воздуха тел, имеющих плохо обтекаемую форму, происходит интенсивное вихреобразование, связанное со срывом потока. Вихревой след может быть схематизирован в виде дорожки Кармана — двойного ряда точечных вихрей, расположенных в шахматном порядке (рис. 4.2). Структура вихревого следа определяет характер пульсаций давления на поверхности тела, а следовательно, и нестационарных аэродинамических сил, действующих на тело в направлении, поперечном потоку. При этом могут существовать несколько режимов обтекания.

1. Колебания с частотой образования вихрей Кармана, когда характер колебаний близок к обычным вынужденным, амплитуды колебаний малы, синхронизации частот не возникает.

2. Колебания в виде биений с двумя частотами — с частотой образования вихрей Кармана и частотой собственных колебаний конструкции. Здесь начинает проявляться влияние движения тела на вихревую систему.

3. Колебания с собственной частотой конструкции в определенном диапазоне скоростей потока, когда происходит захват частоты образования вихрей частотой колеблющегося тела. Это и есть ветровой резонанс.

Ветровой резонанс — автоколебательный процесс, в механизме которого главную роль играет система вихрей, регулирующая поступление энергии из равномерного потока в колебательную систему «порциями», и в этом проявляется ее действие как регулятора. В то же время колебания тела воздействуют на систему вихрей — при некоторых условиях происходит захват частоты образования вихрей и увеличение их интенсивности, т.е. колебательная система управляет регулятором. Частота образования вихрей составляет

$$f_k = u \text{Sh}/d,$$

где u — скорость набегающего потока; d — характерный размер поперечного сечения; Sh — число Струхала, которое зависит от формы профиля и определяется опытным путем. При условии, что

частота образования вихрей равна собственной частоте тела f_{0i} , определяется критическая скорость ветра, вызывающая резонансные колебания сооружения в направлении, перпендикулярном ветровому потоку:

$$u_{кр i} = f_{0i} d / Sh.$$

Скоростной напор, Н/м², при этом $q_{кр i} = u_{кр i}^2 / 1,6$.

Если $u_{кр}^{\min} \geq u_{кр i} \geq 25$ м/с, где $u_{кр}^{\min} \geq 2\sqrt{0,1q_0}$, то расчет на ветровой резонанс не производится.

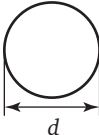
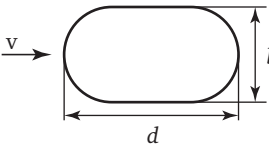
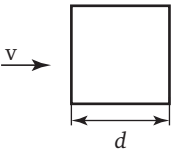
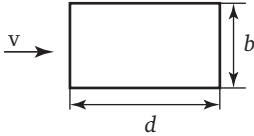
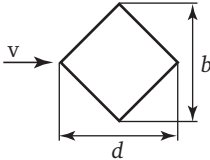
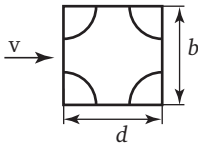
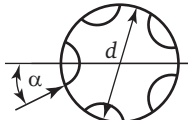
Вихревой резонанс возникает не только у тел круглого сечения, но и у тел с многоугольным сечением. При обтекании таких тел существенны два момента: независимость вихревого следа от чисел Рейнольдса и хорошая коррелированность схода вихрей по высоте, так как угловые точки являются точками фиксированного отрыва потока. Для таких тел влияние на ветровой резонанс оказывают длина хорды профиля и форма «хвостовой» части, причем длина хорды имеет оптимальный размер, с увеличением она становится помехой образованию вихрей. Число Струхала (Sh) тел различной формы и сечения для числа Рейнольдса (Re) представлены в табл. 4.5.

При ветровом резонансе существенную роль играет изменение сечения по высоте сооружения. В конических элементах ветровое возбуждение проявляется в меньшей степени. Причиной этого является худшая коррелированность срыва вихрей по высоте из-за различного диаметра. Для конических элементов с уклоном не более 1:100 в качестве характерного размера для подсчета числа Струхала берут замер сечения, лежащего на 3/4 высоты сооружения. Тела, имеющие ступенчатую структуру, в большей мере подвержены ветровому резонансу, сказывается лучшая коррелированность срыва вихрей на каждом участке.

Для таких тел нужно рассматривать несколько критических скоростей, соответствующих различным диаметрам сечений, т.е. ветровой резонанс может возникнуть при нескольких резонансных скоростях. Влияние градиента скорости по высоте сооружения аналогично влиянию плавного изменения сечения.

При проверке на резонанс амплитуду интенсивности аэродинамической силы $F_i(z)$ на уровне z при колебаниях сооружения по i -й форме определяют по формуле

4.5. Число Струхала для тел различной формы и числа Рейнольдса

Форма сечения	Число Sh	Соотношение d/b	Число Re
	0,18...0,2 0,2	1,0	$10^4 \dots 2 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^7$
	0,18...0,2 0,12...0,13	2,0 0,5	$10^5 \dots 6,5 \cdot 10^5$ $(3 \dots 5) 10^5$
	0,14	1,0	$10^4 \dots 10^6$
	0,14	2,0	$10^4 \dots 10^6$
	0,14...0,15	1,33	$10^4 \dots 2 \cdot 10^6$
	0,11...0,12	1,0	$10^4 \dots 10^6$
	0,11...0,14	1,0	$10^4 \dots 10^6$

$$F_i(z) = F_{0i} \alpha_i(z),$$

где $\alpha_i(z)$ — относительная координата i -й формы колебаний; $F_i(z) = q_{\text{кри}} c_y d$ — амплитудное значение погонной нагрузки на конструкцию в сечении с максимальным смещением.

Расчетная нагрузка на j -й участок, соответствующая i -й форме колебаний

$$Q_{ij}^{\text{кр}} = C_y q_{\text{кри}} F_j d_{ij} \mu_{\text{рез}},$$

где $c_y = 0,25$ — аэродинамический коэффициент поперечной силы; $\mu_{\text{рез}} = \pi/\delta$ — динамический коэффициент при резонансе; δ — логарифмический декремент колебаний, принимаемый равным: 0,15 — для железобетонных постаментов, 0,10 — для мачт и стальных футерованных труб, 0,05 — для стальных сооружений и конструкций.

Для определения наибольших усилий и деформаций конструкции при резонансе учитываются статическая и динамическая составляющие ветровой нагрузки, соответствующие критической скорости ветра.

Расчетное усилие или перемещение сооружения определяется по формуле

$$X_{ij}^{\text{рез}} = \sqrt{(X_{ij}^{\text{кр}})^2 + (X_{ij}^{\text{ст}} + X_{ij}^{\text{дин}})^2},$$

где $X_{ij}^{\text{кр}}$ — изгибающий момент, поперечная сила или перемещение от действия резонансных сил $X_j^{\text{ст}}$ и $X_{ij}^{\text{дин}}$ от действия статических и динамических нагрузок.

Галопирование

Галопирование является одним из наиболее опасных видов колебаний аэродинамически неустойчивых тел. Примером может служить поведение тонкой упругой пластинки, расположенной поперек потока. Уже при малых скоростях потока она начинает совершать регулярные резонансные колебания. С увеличением скорости амплитуда колебаний растет, но частота, в отличие от резонансных колебаний, увеличивается незначительно.

Физическая природа явления галопирования (рис. 4.3) заключается в следующем. На тело, совершающее движение поперек набегающего потока, действуют возмущающая сила, восстанавли-

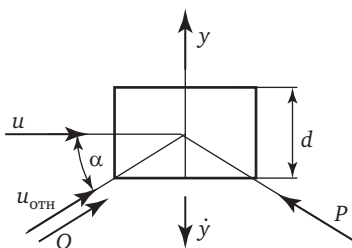


Рис. 4.3. Схема действия аэродинамических сил при галопировании

ливающая упругая сила и сила сопротивления. Возмущающей силой, вызывающей колебания, является проекция аэродинамической нагрузки на направления движения. Так как тело движется поперек потока, относительная его скорость направлена под углом

$$\alpha = \arctg \frac{\dot{y}}{u},$$

где $\dot{y}$ — скорость движения тела; u — скорость потока.

Проекция аэродинамической нагрузки на вертикаль

$$P_{\text{см}} = Q_y + P_y = Q \sin \alpha + P \cos \alpha, \quad (4.17)$$

где $Q = \frac{\rho u_{\text{отн}}^2}{2} d c_x$ — лобовая составляющая погонной ветровой на-

грузки; $P = \frac{\rho u_{\text{тн}}^2}{2} d c_y$ — подъемная сила; C_x, C_y — аэродинамические коэффициенты (зависят от α).

Для круглого цилиндра $P_y = 0$, а $P_{\text{см}} = Q \sin \alpha$ и направлена вверх, т.е. противоположно скорости и препятствует перемещению тела; для неосесимметричного тела (например призмы квадратного поперечного сечения) направление силы $P_{\text{см}}$ будет определяться знаком и величиной P_y ; при $P_{\text{см}} < 0$ скорость перемещения призмы возрастает.

Так как скорость движения тела зависит от угла атаки, который также возрастает, то изменяется и вертикальная составляющая аэродинамической силы.

Колебания тела будут возбуждаться в том случае, если при отрицательном значении силы $P_{\text{см}}$ и возрастании скорости (а значит и угла α) модуль ее будет увеличиваться. Следовательно,

$$\left. \frac{dP_{\text{см}}}{d\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow 0} < 0 \quad (4.18)$$

условие потери аэродинамической устойчивости (критерий Ден-Гартога).

Учитывая (4.17) и (4.18), находим

$$\frac{dP_{\text{CM}}}{d\alpha} = \frac{\rho u_{\text{OTH}}^2}{2} d \left(\frac{dC_x}{d\alpha} \sin \alpha + C_x \cos \alpha + \frac{dC_y}{d\alpha} \cos \alpha - C_y \sin \alpha \right),$$

следовательно, при $\alpha \rightarrow 0$, получим

$$\left. \frac{dP_{\text{CM}}}{d\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow 0} = \frac{\rho u_{\text{OTH}}^2}{2} d \left(C_x + \frac{dC_y}{d\alpha} \right),$$

тогда, учитывая (4.18), условие аэродинамической неустойчивости примет вид

$$\left(C_x + \frac{dC_y}{d\alpha} \right) \Big|_{\alpha \rightarrow 0} < 0. \quad (4.19)$$

Так как $C_x > 0$, условие (4.19) выполняется, если

$$\frac{dC_y}{d\alpha} < 0 \quad \text{и} \quad \left| \frac{dC_y}{d\alpha} \right| > C_x.$$

Построив графики зависимости функции (4.19) от α , можно определить зоны углов аэродинамической неустойчивости для различных профилей (рис. 4.4). Из этих графиков следует, что галомирование для стержней с сечением в форме ромба и астроида возможно при $\alpha = 26 \dots 55^\circ$, т.е. значение функции отрицательно.

Условие (4.19) получено в предположении отсутствия сопротивления. В реальных конструкциях галомирование с конечной амплитудой будет происходить лишь при тех скоростях потока, при которых поступление энергии в систему из потока за цикл колебаний оказывается равным ее рассеиванию за счет внутреннего трения в конструкции в течение того же цикла. Этот баланс энергии наступает, начиная с некоторой критической скорости потока $u_{\text{мг}}$.

Теоретическая величина критической скорости потока, начиная с которой возникает галомирование для элемента с равномерно распределенной массой, составит

$$u_{\text{мг}} = \frac{4mf_0\delta_k}{\rho dA_1},$$

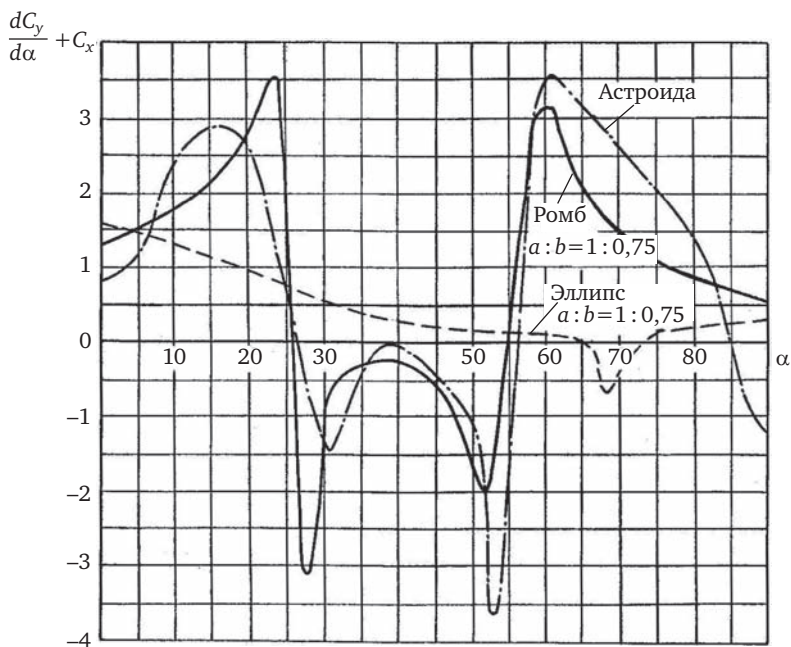


Рис. 4.4. График аэродинамической неустойчивости

где $m = M/h$ — погонная масса сооружения; M — масса сооружения; h — длина; δ_k — логарифмический декремент колебаний; ρ — плотность воздуха; d — диаметр элемента; f_0 — частота собственных колебаний системы; $A_1 = -(C_y^\alpha + C_x) \big|_{\alpha \rightarrow \alpha_0}$.

Если для рассматриваемого профиля среди отрицательных значений A_1 найти минимальную величину, то по ней можно определить наименьшее значение $u_{\text{мг}}$. Однако теоретический анализ может давать весьма приближенную оценку границы возникновения галопирования. Значительно более полную и надежную информацию можно получить, проводя испытания аэроупругих моделей в аэродинамической трубе.

Явление галопирования характерно тем, что при увеличении скорости потока, превышающей критическую $u > u_{\text{мг}}$, происходит резкое возрастание амплитуд колебаний и динамических напряжений, что может привести к разрушению конструкции. При галопировании амплитуды могут существенно превышать поперечный размер сооружения. Помимо непрерывного роста амплитуды ха-

рактерной чертой галопирования является то, что частота и форма колебаний при этом весьма близки к частоте и форме тела.

Галопирование возникает не только у сооружений, имеющих сечения с фиксированными точками отрыва потока. Если вытянутый эллиптический или двояковыпуклый профиль установить под углом атаки, то может произойти потеря аэроупругой колебательной устойчивости.

При изморози или гололеде на проводах линий электропередач образуются ледяные наросты, вытянутые в вертикальном направлении. Общеизвестны случаи, когда под действием бокового ветра возникали устойчивые вертикальные колебания обледенелых проводов с большими амплитудами, что является одной из разновидностей галопирования. Эксплуатация сооружения недопустима, если существует опасность возникновения галопирования. Поэтому при проектировании сооружений, формы поперечных сечений которых обуславливают их склонность к галопированию, необходимо определить ориентировочное значение скорости начала галопирования по приведенным формулам, и далее, если скорость потока, соответствующая началу галопирования, близка к значениям реальных для рассматриваемого района скоростей ветра, уточнить ее путем испытаний динамически подобных моделей в аэродинамических трубах и принять меры по безусловному предотвращению галопирования.

4.3. Гололедная нагрузка

Гололедная нагрузка имеет существенное значение при проектировании линий связи, электропередач, антенно-мачтовых устройств и других подобных сооружений.

Обледенение происходит при оседании на провода переохлажденной воды в виде тумана, дождя, при непосредственном переходе в лед (сублимации) водяного пара, содержащегося в воздухе. Важность учета гололедных нагрузок вызвана тем, что очень часто гололедные образования значительно превосходят собственную массу элемента и существенно увеличивают его парусность. Неправильный учет этого вида нагрузки может привести к разрушениям. Продолжительность гололедного образования может составлять от нескольких десятков минут до нескольких суток. Для расчета голо-

ледной нагрузки в качестве исходной информации берется толщина стенки гололеда, полученная на основе статистической обработки многолетних наблюдений на метеостанциях. По величине гололедных образований территория нашей страны разделена на пять районов. В качестве расчетной величины принято значение толщины стенки гололеда, которая образуется на цилиндре диаметром 10 мм, замеренное на высоте 10 м при $\gamma = 0,9 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$ (табл. 4.6). Результаты многолетних наблюдений за обледенением проводов показывают, что толщина стенки гололеда с увеличением диаметра провода уменьшается, а с возрастанием высоты подвеса увеличивается. Коэффициенты изменения толщины стенки гололеда k_{rz} в зависимости от высоты приведены в табл. 4.7.

4.6. Толщина стенки гололеда для районов гололедности

Районы гололедности	I	II	III	IV	V
Толщина стенки, мм	3	5	10	15	20

4.7. Коэффициент изменения толщины стенки гололеда от высоты

Высота над поверхностью земли, м	5	10	20	30	50	70	100
K_{rz}	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

Зависимость толщины стенки гололеда от диаметра элемента учитывается масштабным коэффициентом k_m , значения которого представлены в табл. 4.8. Толщина стенки гололедного образования для тросов, проводов и канатов составляет $b = b_0 k_{rz} k_m$.

4.8. Масштабный коэффициент

Диаметр элемента, мм	5	10	20	30	50	70
k_m	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Необходимо иметь в виду, что гололедное образование может иметь различную форму и условная толщина стенки является приведенной, соответствующей цилиндрической форме. Нормативная гололедная нагрузка вычисляется по формуле

$$w = F_r \gamma,$$

где $F_r = \pi b (d + b)$ — площадь сечения гололедного образования элемента цилиндрической формы.

Площадь сечения гололедного образования элементов другой

формы определяется исходя из предположения, что толщина его стенки постоянна.

Для двухмерных элементов сооружений произвольной формы нормативная гололедная нагрузка на поверхности, приходящаяся на единицу площади, вычисляется по формуле

$$P_r = 0,6 b \gamma,$$

где 0,6 — коэффициент, учитывающий отношение площади поверхности элемента сооружения, подверженного обледенению, к полной площади поверхности элемента.

Расчетная гололедная нагрузка определяется по формуле

$$W_r^p = n_{\pi} W_r \quad \text{или} \quad P_r^p = n_{\pi} P_r,$$

где n_{π} — коэффициент перегрузки.

Скоростной напор ветра для элементов, покрытых гололедом, принимается равным $q_{0r} = 0,25 q_0$, но не более 300 Па.

При определении нормативного значения ветровой нагрузки необходимо учитывать следующее: аэродинамический коэффициент для обледенелых тросов, канатов, проводов и других элементов цилиндрической формы следует принимать исходя из условия, что гололедное отложение имеет цилиндрическую форму; для остальных элементов считать, что гололед не меняет их форму; площадь, воспринимающая ветровую нагрузку, берется с учетом гололедных отложений.

Расчетная ветровая нагрузка принимается с учетом коэффициента перегрузки. Температура воздуха при гололеде принимается равной: в горных районах с отметкой выше 2000 м — минус 15 °С; в горных районах с отметкой 1000...2000 м на территории к востоку от Енисея, за исключением береговой полосы океанов и морей — минус 10 °С; для всей остальной территории РФ для сооружений высотой до 100 м — минус 5 °С, выше 100 м — минус 10 °С.

4.4. Температурные климатические воздействия

Изменение температуры наружного воздуха вызывает изменения температуры конструкции, что приводит к возникновению в ней температурных напряжений. Величины напряжений зависят от величин температурных перепадов.

При расчете температурных перепадов существенным моментом является определение начальной, монтажной температуры, и конечной. Под начальной температурой понимается температура воздуха, при которой происходит замыкание конструкции или ее части в законченную систему. Если замыкание конструкции происходит в холодное время года, то монтажная температура составит

$$t_o^x = 0,2 t_{VII} + 0,8 t_I;$$

в теплое время года

$$t_o^T = 0,8 t_{VII} + 0,2 t_I,$$

где t_I , t_{VII} — многолетние среднемесячные январская и июльская температуры воздуха, принимаемые по картам средних температур для заданного района строительства.

Нормативные значения температуры наружного воздуха в теплое и холодное время года определяются по формулам

$$t_H^T = t_{VII} + \Delta_{VII}; \quad t_H^x = t_I - \Delta_I,$$

где Δ_{VII} и Δ_I — отклонения средней температуры наиболее теплых и наиболее холодных суток от значений t_{VII} и t_I ($\Delta_{VII} = 6^\circ\text{C}$). При этом Δ_I принимается по карте отклонений средней температуры наиболее холодных суток от средней январской температуры воздуха.

Расчетные значения температур принимают с запасом

$$t^T = t_H^T + 3^\circ\text{C}; \quad t^x = t_H^x - 6^\circ\text{C}.$$

Расчетный перепад температуры вычисляется как разность монтажной и расчетной температур. Если монтаж конструкции проводится в холодное время года, то расчет ведется с учетом температур теплого времени года.

Для конструкций, не защищенных от воздействия солнечной радиации,

$$\Delta t^T = t^T - t_o^x + T_1,$$

где T_1 — температура, учитывающая суточное изменение температуры наружного воздуха и солнечную радиацию (для металлических конструкций $T_1 = 20^\circ\text{C}$). Если монтаж конструкции проводится в теплое время года, то расчет перепада ведется с учетом температуры холодного времени года:

$$\Delta t^x = t^x - t_o^T.$$

Большее значение перепада температуры используется далее для расчета конструкции на прочность и жесткость.

4.5. Сейсмическое воздействие

Строительство в сейсмических районах

Перемещение грунта при землетрясении вызывает колебания сооружения, а возникающие при этом инерционные силы являются причиной деформации конструкций. Расчетная сейсмическая нагрузка — это статически действующие силы, вызывающие в конструкциях усилия, близкие к тем, которые возникают в них под действием максимальных инерционных сил во время землетрясения.

4.9. Сейсмичность площадки строительства при различной категории грунтов

Категория групп по сейсмическим свойствам	Грунты	Сейсмичность площадки строительства при сейсмичности района, баллы		
		7	8	9
I	Скальные грунты всех видов (в том числе вечномерзлые и вечномерзлые оттаявшие) невыветрелые и слабовыветрелые: крупнообломочные грунты плотные маловлажные из магматических пород, содержащие до 30% песчано-глинистого заполнителя; выветрелые и сильновыветрелые скальные и нескальные твердомерзлые (вечномерзлые) грунты	6	7	8
II	Скальные грунты выветрелые и сильновыветрелые, в том числе вечномерзлые, кроме отнесенных к I категории; крупнообломочные грунты, за исключением отнесенных к I категории; пески гравелистые, крупные и средней крупности, плотные и средней плотности маловлажные и влажные; пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности маловлажные; глинистые грунты	7	8	9
III	Пески рыхлые независимо от влажности и крупности: пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности водонасыщенные; пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности влажные и водонасыщенные; глинистые грунты с показателем консолидации $I_L > 0,5$; глинистые грунты вечномерзлые нескальные (допускается оттаивание грунтов основания)	8	9	>9

При проектировании зданий и сооружений для строительства в сейсмических районах следует учитывать интенсивность сейсмического воздействия в баллах (сейсмичность) и повторяемость сейсмического воздействия, которые принимают по картам сейсмического районирования. В районах, для которых отсутствуют карты сейсмического районирования, сейсмичность площадки для строительства принимают по табл. 4.9 (СНиП 11-7—81).

При расчете зданий и сооружений на особое сочетание нагрузок значения расчетных нагрузок следует умножать на коэффициенты сочетаний, которые приведены в табл. 4.10. Горизонтальные нагрузки от масс на гибких подвесках, температурные климатические воздействия, ветровые нагрузки, динамические воздействия от оборудования и транспорта, тормозные и боковые усилия от движения кранов при этом не учитываются.

При строительстве на вечномерзлых нескальных грунтах, если зона оттаивания распространяется до подстилающего талого грунта, грунты основания следует рассматривать как не вечномерзлые (по фактическому состоянию после оттаивания). Для особо ответственных зданий и сооружений, строящихся в районах сейсмичностью 6 баллов на площадках строительства с грунтами III категории по сейсмическим свойствам, расчетную сейсмичность следует принимать равной 7 баллам. При отсутствии данных о консистенции или влажности глинистые и песчаные грунты при положении уровня грунтовых вод выше 5 м относят к III категории по сейсмическим свойствам.

Расчетные нагрузки

Расчет конструкций и оснований зданий и сооружений, проектируемых для строительства в сейсмических районах, должен выполняться на основные и особые сочетания нагрузок с учетом сейсмических воздействий.

4.10. Коэффициент n_c при расчете на особое сочетание нагрузок

Нагрузки	Коэффициент сочетаний n_c
Постоянные	0,9
Временные длительные	0,8
Кратковременные (на перекрытия и покрытия)	0,5

При проектировании особо ответственных зданий и сооружений на особые сочетания нагрузок с учетом сейсмических воздействий сейсмическая нагрузка учитывается с использованием инструментальных записей ускорений основания при землетрясении, наиболее опасных для данного здания или сооружения, а также синтезированных акселерограмм. При этом максимальные амплитуды ускорений основания следует принимать не менее 100, 200 или 400 см/с² при сейсмичности площадок строительства 7, 8 и 9 баллов соответственно.

Сейсмические воздействия могут иметь любое направление в пространстве. Для зданий и сооружений простой геометрической формы расчетные сейсмические нагрузки принимают действующими горизонтально в направлении их продольной и поперечной осей. Действие сейсмических нагрузок в указанных направлениях следует учитывать раздельно. При расчете сооружений сложной геометрической формы учитывают наиболее опасные для данной конструкции или ее элементов направления действия сейсмических нагрузок. Вертикальную сейсмическую нагрузку необходимо учитывать при расчете горизонтальных и наклонных консольных конструкций; пролетных строений мостов; рам, арок, ферм, пространственных покрытий зданий и сооружений пролетом 24 м и более; сооружений на устойчивость против опрокидывания или скольжения.

Расчетная сейсмическая нагрузка S_{ik} в выбранном направлении, приложенная к точке k (рис. 4.5) и соответствующая i -му тону собственных колебаний зданий или сооружений, определяется по формуле

$$S_{ik} = Q_k A \mu_i K_w \eta_{ik},$$

где Q_k — вес здания или сооружения, отнесенный к точке k , определяемой с учетом расчетных нагрузок на конструкции; A — коэффициент, значения которого следует принимать равными 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов; μ_i — коэффициент динамичности, соответствующий i -му тону собственных колебаний зданий или сооружений;

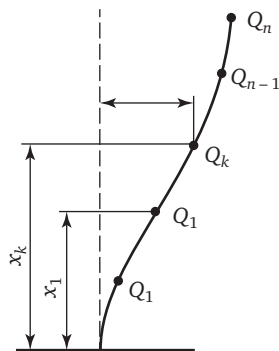


Рис. 4.5. Схема расчетной сейсмической нагрузки

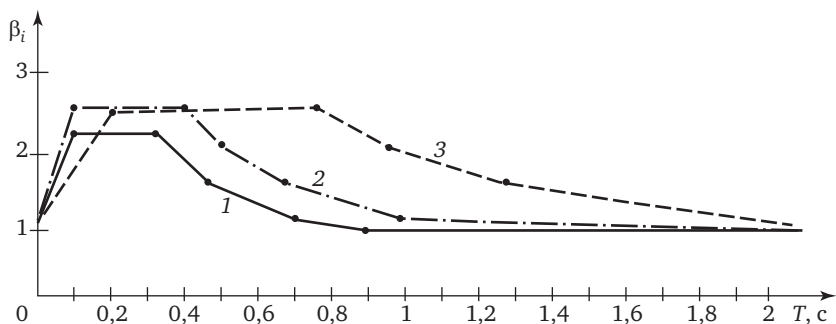


Рис. 4.6. Коэффициент динамичности для грунтов I—III категорий

K_w — коэффициент увеличения расчетной нагрузки, принимаемый по табл. 4.12; η_{ik} — коэффициент ускорения, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -му тону и от места расположения нагрузки.

Коэффициент динамичности μ_i (рис. 4.6) в зависимости от расчетного периода собственных колебаний T_{0i} здания или сооружения по i -му тону при определении сейсмических нагрузок следует принимать по формулам:

для грунтов I категории по сейсмическим свойствам (кривая 1):

$$\begin{aligned} \text{при } T_{0i} < 0,08 \text{ с} \quad & b_i = 1 + 15T_{0i}; \\ \text{при } 0,08 \text{ с} < T_{0i} < 0,318 \text{ с} \quad & b_i = 2,2; \\ \text{при } T_{0i} > 0,318 \text{ с} \quad & b_i = 0,7 T_{0i}; \end{aligned} \quad (4.20)$$

для грунтов II и III категорий при мощности слоя, равном 30 м и менее (кривая 2):

$$\begin{aligned} \text{при } T_{0i} < 0,1 \text{ с} \quad & b_i = 1 + 15T_{0i}; \\ \text{при } 0,1 \text{ с} < T_{0i} < 0,4 \text{ с} \quad & b_i = 2,5; \\ \text{при } T_{0i} > 0,4 \text{ с} \quad & b_i = 1/T_{0i}; \end{aligned} \quad (4.21)$$

для грунтов II и III категорий при мощности слоя более 30 м (кривая 3):

$$\begin{aligned} \text{при } T_{0i} < 0,2 \text{ с} \quad & b_i = 1 + 7,5 T_{0i}; \\ \text{при } 0,2 \text{ с} < T_{0i} < 0,76 \text{ с} \quad & b_i = 2,5; \\ \text{при } T_{0i} > 0,76 \text{ с} \quad & b_i = 1,9/T_{0i}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.11. Расчетная сейсмичность для различных сооружений

Характеристика зданий и сооружений	Расчетная сейсмичность при сейсмичности площадки строительства, баллы		
	7	8	9
Жилые, общественные и производственные здания и сооружения	7	8	9
Особо ответственные здания и сооружения *	8	9	9**
Здания и сооружения, повреждение которых связано с особо тяжелыми последствиями (вокзалы, крытые стадионы и др.)	7**	8**	9***
Здания и сооружения, разрушение которых не связано с гибелью людей, порчей ценного оборудования и не вызывает прекращения непрерывных производственных процессов, а также временные здания и сооружения	Без учета сейсмических воздействий		

* Определяется заказчиком.

** Здания и сооружения рассчитываются на нагрузку, соответствующую расчетной сейсмичности, умноженную на дополнительный коэффициент 1,5.

*** То же, с коэффициентом 1,2.

4.12. Коэффициент увеличения расчётной нагрузки

Конструктивные решения зданий и сооружений	Коэффициент K_w
1. Высокие сооружения небольших размеров в плане (башни, мачты, дымовые трубы, отдельно стоящие шахты лифтов и др.)	1,5
2. Каркасные здания, стеновое заполнение которых не оказывает влияния на его деформативность при отношении высоты стоек h к поперечному размеру b в направлении действия расчетной сейсмической нагрузки, равной или более 25	1,5
3. То же, что в п. 2, но при отношении h/b , равном или менее 15	1
4. Здания и сооружения, не указанные в пп. 1—3	1

Примечание. При промежуточных значениях h/b значение K_w принимается интерполяцией; при разных высотах этажей значение K_w принимается по средним значениям h/b .

Во всех случаях значения b_i должны приниматься не менее 0,8.

Для зданий и сооружений, рассчитываемых по консольной схеме, значение коэффициента ускорения n_{ik} следует определять по формуле

$$n_{ik} = \frac{X_j(x_1) \sum Q_j X_i(x_1)}{\sum Q_j X_i^2(x_1)},$$

где $X_i(x_k)$ и $X_i(x_j)$ — смещения здания или сооружения при собственных колебаниях по i -му тону в рассматриваемой точке k и во всех точках j , где в соответствии с расчетной схемой его масса принята сосредоточенной; Q_j — вес здания или сооружения, отнесенный к точке j , определяемой с учетом расчетных нагрузок на конструкцию.

Усилия в конструкциях зданий и сооружений (и их элементах), проектируемых для строительства в сейсмических районах, определяют с учетом не менее трех форм собственных колебаний, если периоды первого (низшего) тона собственных колебаний T_1 более 0,4 с, и с учетом только первой формы, если T_1 равно или менее 0,4 с.

При расчете конструкций на прочность и устойчивость кроме коэффициентов условий работы, принимаемых в соответствии с другими СНиП, следует вводить дополнительно коэффициент ус-

4.13. Коэффициент условий работы

Конструкции	Коэффициент $m_{кр}$
<i>При расчетах на прочность</i>	
1. Стальные и деревянные	1,4
2. Железобетонные со стержневой и проволочной арматурой (кроме проверки прочности наклонных сечений):	
а) из тяжелого бетона с арматурой классов А-I, А-II, А-III, Вр-I	1,2
б) то же, с арматурой других классов	1,1
в) из легкого бетона	1,1
г) из ячеистого бетона с арматурой всех классов	1,0
3. Железобетонные, проверяемые по прочности наклонных сечений:	
а) колонны многоэтажных зданий	0,9
б) прочие элементы	1,0

Окончание табл. 4.13

Конструкции	Коэффициент $m_{кр}$
4. Каменные, армокаменные и бетонные:	
а) при расчете на внецентренное сжатие	1,2
б) при расчете на сдвиг и растяжение	1,0
5. Сварные соединения	1,0
6. Болтовые (в том числе соединяемые на высокопрочных болтах) и заклепочные соединения	1,1
<i>При расчетах на устойчивость</i>	
7. Стальные элементы гибкостью более 100	1,0
8. То же, гибкостью до 20	1,2
9. То же, гибкостью от 20 до 100	От 1,2 до 1,0 (по интерполяции)

Примечания: 1. Для указанных пп. 1—4 конструкций зданий и сооружений, возводимых в районах с повторяемостью 1, 2, 3, значение $m_{кр}$ следует умножать на 0,85; 1 или 1,5 соответственно.

2. При расчете стальных и железобетонных несущих конструкций, подлежащих эксплуатации в неотапливаемых помещениях или на открытом воздухе при расчетной температуре ниже минус 40 °С, следует принимать $m_{кр} = 1$, в случаях проверки прочности наклонных сечений колонн $m_{кр} = 0,9$.

ловий работы $m_{кр}$, определяемый по табл. 4.13.

Расчетные значения поперечной и продольной сил, изгибающего и опрокидывающего моментов, нормальных и касательных напряжений в конструкциях от сейсмической нагрузки при условии статического действия ее на сооружение следует определять по формуле

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2},$$

где N_i — значения сил или напряжений в рассматриваемом сечении, вызываемых сейсмическими нагрузками, соответствующими i -й форме колебаний; n — число учитываемых форм колебаний.

4.6. Воздействие ударной волны

Параметры ударной волны

Основным поражающим фактором при различных видах взрывных воздействий для большинства антенных сооружений является воздушная ударная волна, параметры которой зависят от мощности взрыва, расстояния от эпицентра, характера взрыва (наземный, подземный, воздушный).

Скачок изменения состояния среды, при котором резко (на тысячных долях сантиметра) изменяются плотность, давление и температура, является границей между двумя состояниями среды — фронт ударной волны или ударный фронт.

Воздействие ударной волны носит импульсивный характер. Основные параметры ударной волны: избыточное давление во фронте Δp_ϕ и длительность фазы сжатия. Характер изменения давления в какой-либо точке пространства при прохождении ударной волны показан на рис 4.7.

Приближенно давление, Па, во фронте воздушной ударной волны определяют по формуле для однородной и безграничной воздушной среды:

$$\Delta p_\phi = 1,233 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{q}{R^3}},$$

где q — полный тротильный эквивалент, Н; R — расстояние до эпицентра взрыва, м.

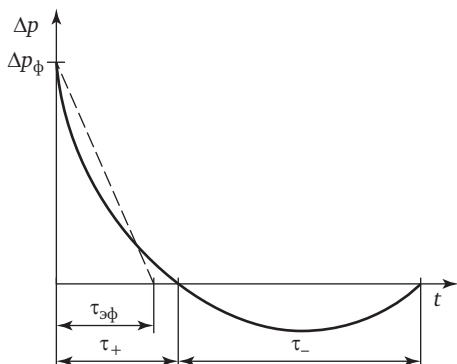


Рис. 4.7. Параметры ударной волны

Длительность фазы сжатия зависит от размеров заряда и расстояния до эпицентра. Ее ориентировочное значение, τ_+ , может быть определено по эмпирической зависимости:

$$\tau_+ = 0,681 \cdot 10^{-3} \sqrt{R} \sqrt[6]{q}.$$

Форму ударного импульса при взрыве принято описывать степенной функцией следующего вида:

$$\Delta p(t) = \Delta p_\phi \left(1 - \frac{t}{\tau_+} \right)^n,$$

где $n = 1,9$, Δp_ϕ округляется до ближайшего целого числа.

Длительность фазы разрежения и максимальное разрежение соответственно могут быть вычислены из следующих выражений:

$$\tau_- = 0,515 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{q};$$

$$\Delta p_- = - \frac{0,11 \cdot 10^5 \sqrt[3]{q}}{R}.$$

В практических расчетах степенная функция изменения давления во времени заменяется линейной:

$$\Delta p(t) = \Delta p_\phi \left(1 - \frac{t}{\tau_{\text{эф}}} \right),$$

где $\tau_{\text{эф}}$ — эффективное действие ударной волны, определяемое из условий равенства импульсов действительной и эквивалентной эпюр давления.

Приведенные зависимости позволяют определить параметры ударной волны в безграничной среде при взрыве любого заряда, в том числе и атомного. Для расчета нужно знать лишь энергию, переносимую в окружающую среду ударной волной.

Взаимодействие ударных волн с преградой

Регулярное отражение ударных волн от неподвижных преград. Весьма часто действие воздушной ударной волны происходит в условиях, когда она набегае на какую-либо преграду на пути ее

движения. В этом случае движущиеся массы воздуха тормозятся преградой, а давление, температура и плотность воздуха повышаются. Это приводит к тому, что разрушающее действие такой ударной волны оказывается большим, чем волны, скользящей вдоль преграды.

Увеличение давления ударной волны, набегающей на преграду, получается наибольшим, когда прочная и неподвижная преграда расположена перпендикулярно направлению распространения волны. В этом случае скорость движения воздуха за фронтом набегающей ударной волны гасится полностью.

В тот момент, когда фронт ударной волны встречается с плоскостью преграды, на ее поверхность внезапно начинает действовать давление, складывающееся из давления, до которого был сжат воздух на скачке уплотнения, и давления от движущейся массы воздуха — давления скоростного напора. Давление скоростного напора может существенно превышать статическое, т.е. то, которое имел воздух на гребне волны, поэтому и суммарное давление может быть много больше, чем статическое. Максимальное давление на преграду происходит в первый момент удара, так как в этот момент и скорость среды в гребне волны и статическое давление самые высокие. В первый момент останавливаются только те частицы, которые находились на фронте действующей волны, затем те частицы, которые находятся в следующем слое, и т.д. Следовательно, образуется новый скачок уплотнения, на котором прекращается движение воздуха в сторону распространения действующей волны, появляется новая ударная волна — отраженная, двигающаяся в обратном направлении — от преграды.

Фронт отраженной ударной волны постепенно удаляется от преграды. Вначале это перемещение определяется главным образом остановкой воздуха, движущегося в действующей волне. Последнее аналогично явлению, которое можно наблюдать при внезапной остановке паровоза, двигающего состав с малой скоростью. В этом случае сначала останавливается ближний к паровозу вагон, а остальные продолжают двигаться по инерции. Затем останавливается второй вагон, за ним третий и т.д., пока волна торможения не дойдет до последнего вагона.

Ударная волна, встречаясь с жесткой преградой, отражается. Давление во фронте отраженной волны (давление на отражающую

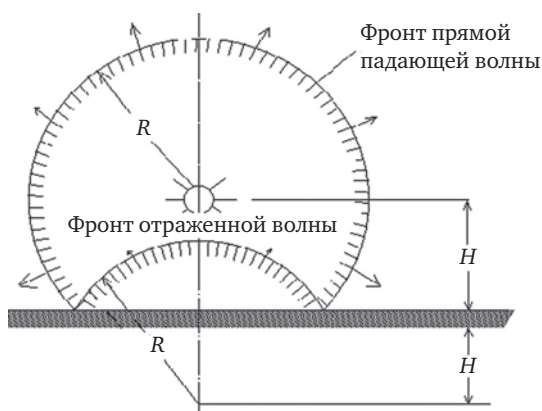


Рис. 4.8. Отражение ударной волны от преграды

поверхность), если волна падает по нормали к преграде, определяется соотношением

$$\Delta p_{\text{отр}} = (\Delta p_{\phi} + 0,1) \frac{8\Delta p_{\phi} + 0,7}{\Delta p_{\phi} + 0,7} - 0,1. \quad (4.23)$$

В зависимости от величины Δp_{ϕ} возрастание давления при отражении будет различным. Например, если Δp_{ϕ} во много раз больше атмосферного давления, получаем $\Delta p_{\text{отр}} = 8\Delta p_{\phi}$.

После торможения воздуха преградой начинается его движение в противоположную сторону. При этом энергия, затраченная на сжатие воздуха, в значительной своей части вновь переходит в энергию движения, и на некотором расстоянии от преграды получается отраженная ударная волна, напоминающая волну, идущую непосредственно от заряда, только несколько ослабленную потерями энергии при отражении. Если преграда плоская и волна отражается от нее при взрыве сосредоточенного заряда, расположенного на расстоянии H от преграды, то, как видно из рис. 4.8, отраженная волна будет распространяться так, как если бы за преградой, также находящейся на расстоянии H , был расположен заряд, вызвавший эту волну своим взрывом. Такое отражение называется регулярным и аналогично отражению звука, света и волн на поверхности воды от соответствующих преград.

Нерегулярное отражение ударных волн. Уже при регулярном отражении наблюдаются некоторые особенности в движении от-

раженной ударной волны, которые содержат начало отступлений от правильного, регулярного отражения. Дело в том, что отраженная волна движется частично по воздуху, уже нагретому и уплотненному падающей волной (рис.4.9), поэтому скорость распространения отраженной волны увеличивается. Пока угол α между фронтом падающей волны и отражающей ее поверхностью меньше 45° (на близких расстояниях от эпицентра взрыва), схема отражения сохраняется. Однако когда указанный угол становится больше 45° — на больших расстояниях от эпицентра взрыва уплотненный при отражении силой воздуха фронт отесняет падающую волну и выдвигается вперед, обгоняя эту волну. Схема нерегулярного отражения ударных волн показана на рис. 4.9.

Если угол α между фронтом волны и отражающей поверхностью равен нулю, то давление возрастает [(см. зависимость (4.23)]. Если угол α равен 90° , то отражения нет, и давление на фронте волны остается неизменным. Если же угол α изменяется от 0 до 90° , то наибольшее возрастание давления происходит при переходе от регулярного отражения к нерегулярному.

Максимальное повышение давления происходит при переходе от регулярного отражения к нерегулярному при угле α , лежащем в пределах от 40 до 70° (в зависимости от избыточного давления во фронте падающей волны).

Волна, образующаяся при слиянии падающей и отраженной волн, называется головной волной (рис. 4.10). Фронт этой волны перпендикулярен к отражающей поверхности. Избыточное давление на фронте головной волны примерно равно избыточному давлению при перпендикулярном падении ударной волны на преграду, если угол между фронтом падающей волны и отражающей поверх-

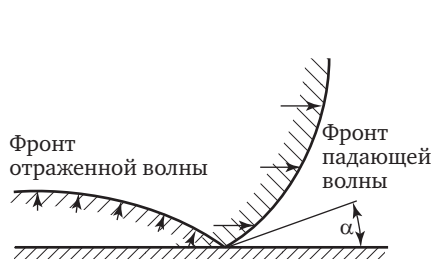


Рис. 4.9. Фронт падающей волны при отражении от плоской преграды

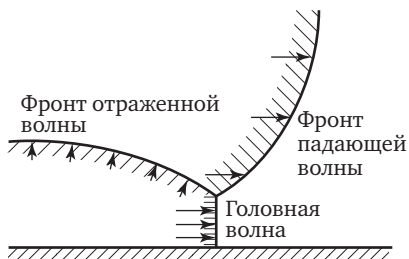


Рис. 4.10. Схема образования головной волны

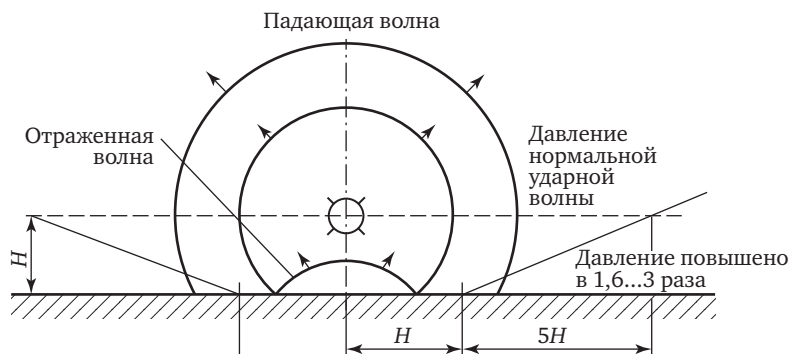


Рис. 4.11. Схема отражения ударной волны от поверхности земли

ностью немного превышает 45° . При увеличении этого угла высота головной волны увеличивается, и постепенно ее избыточное давление начинает приближаться к давлению на фронте падающей волны. Когда указанный угол приближается к прямому, превышение избыточного давления на фронте головной волны над избыточным давлением падающей волны составляет около 50% и даже несколько меньше, если учесть потери энергии при отражении. Таким образом, избыточное давление в головной волне в итоге становится примерно в полтора раза больше, чем в падающей.

Далее рассмотрим распространение ударных волн при взрыве какого-либо заряда на некоторой высоте над плоской поверхностью земли. Такой взрыв называется воздушным взрывом. На рис. 4.11 показано развитие отражения ударной воздушной волны от поверхности земли. В точках, находящихся от эпицентра на расстояниях меньше, чем высота H точки взрыва над поверхностью земли, получается регулярное отражение, а в точках, находящихся от эпицентра на расстояниях, превышающих указанную высоту, начинается нерегулярное отражение и возникает головная волна. Высота фронта головной волны постоянно увеличивается и, наконец, достигает высоты, на которой произошел взрыв. После этого форма фронта головной волны начинает изменяться, и он приобретает форму части поверхности шара с центром, расположенным в эпицентре.

Обтекание ударными волнами объектов ограниченных размеров. Движение воздушной ударной волны вдоль ровной и гладкой поверхности земли — сравнительно редкий случай. Гораздо

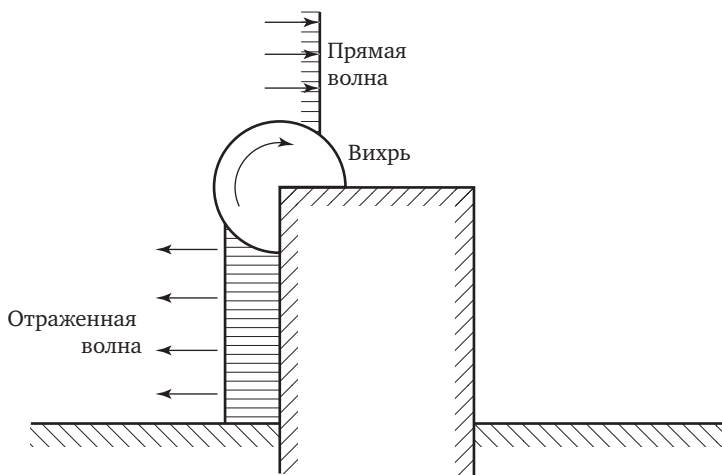


Рис. 4.12. Схема взаимодействия ударной волны с вертикальной стеной

чаще на пути распространения ударной волны встречаются здания, деревья, предметы, а также различные неровности местности. В этих случаях распространение воздушной ударной волны будет видоизменяться. Она будет частично отражаться от предметов и частично обтекать их.

Рассмотрим это явление на простейшем примере. Представим себе достаточно прочную вертикальную стену, которая выдерживает воздействие воздушной ударной волны. Набегающая на стену ударная воздушная волна будет отражаться от нее. Допустим, что волна падает на стену перпендикулярно (рис. 4.12). В результате отражения около поверхности стены образуется слой уплотненного воздуха, ограниченный снаружи фронтом зарождающейся отраженной волны. Однако следует обратить внимание на то, что уже в рассматриваемый момент начинается некоторое искажение плоского фронта у края преграды в уплотненном слое воздуха за фронтом отраженной волны. Эти искажения состоят в том, что сильно сжатый у поверхности стены слой воздуха ничем не уравновешен, так как давление воздуха меньше, чем в уплотненном слое. В результате воздух из уплотненного слоя начинает истекать вверх, и волна разрежения (пониженного давления) начинает распространяться вниз по уплотненному слою воздуха. В пределах, захваченных этой волной, воздух движется не только вверх, но и отклоняется движу-

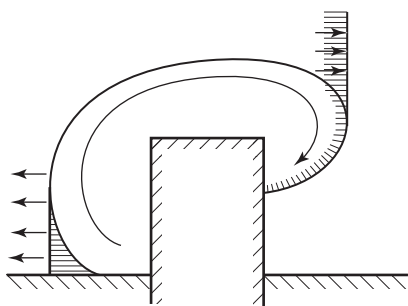


Рис. 4.13. Отражение ударной волны от вертикальной стены

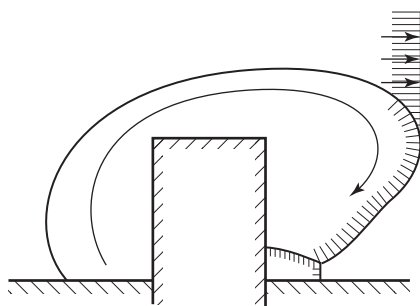


Рис. 4.14. Отражение ударной волны от поверхности земли за стеной

щимся над преградой воздухом в сторону распространения основной ударной волны. В результате направление движения воздуха искривляется, и получается вихрь, закручивающийся по направлению движения часовой стрелки (см. рис. 4.12). В результате появления этого вихря давление воздуха на верхнюю часть стены резко снижается, потому что, во-первых, уменьшается плотность воздуха вследствие его растекания, и, во-вторых, центробежные силы отжимают воздух от верхней поверхности преграды. Снаружи вихрь оказывается ограниченным изогнутым фронтом отраженной ударной волны. Здесь центробежные силы уплотняют воздух за фронтом отраженной волны, и давление становится выше, чем в прилегающей к преграде части отраженной волны. Именно этим и объясняется возникновение искривленной части отраженной ударной волны, охватывающей верхний край преграды.

С течением времени рассмотренные явления обтекания усиливаются и развиваются, но общий их характер сохраняется прежним. На рис. 4.13 показан момент, когда искривленная часть отраженной волны уже обогнула верхний край преграды и движется вниз по тыльной части стены, сливаясь с фронтом первоначальной волны. В результате тыльная поверхность преграды постепенно загружается повышенным давлением воздуха, а передняя поверхность, обращенная в сторону взрыва, постепенно разгружается. Волна разрежения, опускаясь вниз по передней поверхности преграды, постепенно снимает высокое давление, получающееся при отражении волны от преграды. Однако даже сниженное давление оказывается несколько больше, чем давление на тыльную сторону

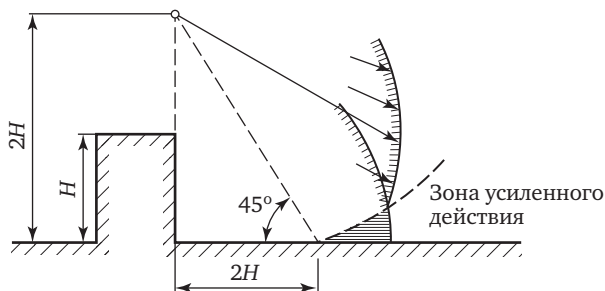


Рис. 4.15. Схема образования головной волны за стеной

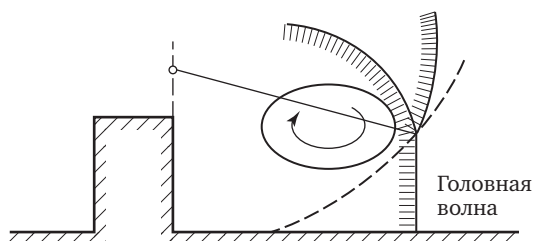


Рис. 4.16. Схема движения ударной волны после обтекания преграды

стены — наступает следующий этап обтекания. Волна (вихрь) доходит до поверхности земли и начинает от нее отражаться с соответствующим увеличением давления, как и первичная ударная волна взрыва отражается от земли (рис. 4.14). По мере движения волна обтекания подходит к поверхности земли, образуя с ней все более и более значительные углы. Центр кривизны фронта этой волны находится на высоте $2H$, приблизительно в два раза превосходящей высоту преграды H . При таких условиях на расстоянии, равном удвоенной высоте $2H$ преграды, фронт ударной волны, огибающей преграду, образует с поверхностью земли угол, равный 45° , что и приводит к образованию головной волны (рис. 4.15).

При дальнейшем движении волны за преградой образуется зона нерегулярного отражения, где действие избыточного давления резко усиливается (рис. 4.16). Головная волна, образовавшаяся при этом, перемещается далее, а вихрь, возникший в результате обтекания ударной волной края преграды, отрывается от нее и распространяется дальше вместе с массой воздуха.

Рассмотрим картину обтекания высокой, но неширокой стены. В этом случае у каждого края стены наблюдаются такие же явле-

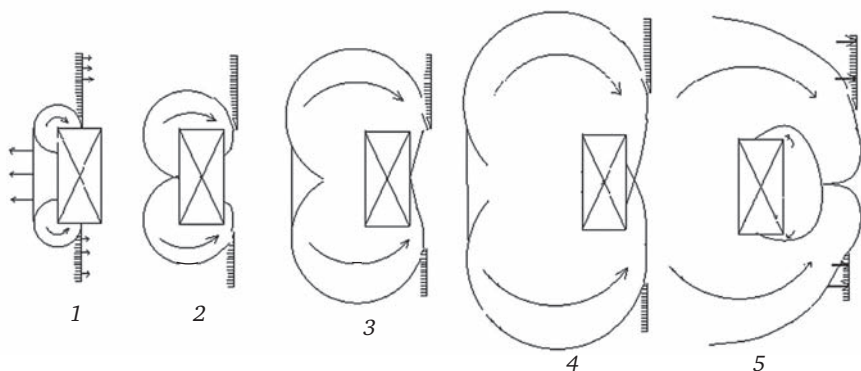


Рис. 4.17. Схемы обтекания высокой неширокой стены

ния, как и рассмотренные ранее. Такое обтекание приведено на рис. 4.17. Особенностью этого случая по сравнению с предыдущим является то, что огибающие преграду с различных сторон волны набегают одна на другую. Происходит соударение этих волн и их взаимное отражение.

Отражение протекает таким путем, как если бы за средней частью преграды в месте соударения стояла тонкая, но прочная преграда, отражающая волны (в предыдущем примере волны отражались от поверхности земли). В результате возникает область нерегулярного отражения с усиленным действием взрыва на расстоянии от преграды, примерно равном ее ширине (см. рис. 4.17).

Рассмотрим еще и такой пример, когда волна обтекает преграду ограниченной высоты и ширины. В этом случае обтекание происходит как сверху, так и с боковых сторон. В результате в зоне нерегулярного отражения волны сходятся сразу с трех сторон и усиление действия взрыва оказывается настолько значительным, что избыточное давление ударной волны не только достигает величины избыточного давления ударной волны до ее удара о преграду, но и превосходит это давление на заметную величину. В результате в определенной части пространства за преградой разрушающее действие взрыва оказывается сильнее, чем при отсутствии преграды.

Распределение областей повышенного и пониженного давления ударной волны при обтекании преграды, высота которой равна половине ширины, показано на рис. 4.18. Необходимо отметить, что наибольшее снижение действия взрыва происходит не в средней

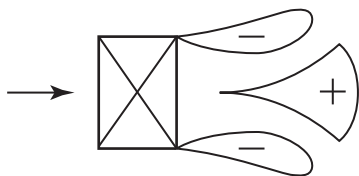


Рис. 4.18. Схема распределения повышенного и пониженного давлений ударной волной при обтекании преграды

части площади, закрываемой преградой от действия ударной волны, а по сторонам от средней линии. Эта особенность кажется несколько неожиданной, но вместе с тем, проявляется достаточно сильно. С ней необходимо всегда считаться при использовании различных местных объектов для защиты от действия атомного взрыва.

Далее рассмотрим силы, действующие в целом на преграду, воспринимающую нагрузку от ударной волны. Воздействие ударной волны разделяется на две фазы. Первая фаза называется фазой дифракции. В течение начального времени, называемого временем обтекания, давление на фронтальную поверхность равно сумме давлений проходящей ударной волны и скоростного напора:

$$\Delta p_{\text{обт}}(t) = \Delta p_{\text{обт}}(t) + \Delta p_{\text{ск}}(t).$$

Во второй фазе, т.е. в период установившегося (квазистационарного) обтекания, давление на фронтальную поверхность в каждый момент времени равно давлению скоростного напора:

$$\Delta p_{\text{скк}} = \Delta p_{\text{ск}}(1 + \varepsilon),$$

где $\Delta p_{\text{ск}} = \rho u_{\text{ф}}^2 / 2$ — скоростной напор; $u_{\text{ф}} = 315 / \sqrt{R^3}$ — скорость воздушного потока непосредственно за фронтом ударной волны; ε — поправка на сжимаемость воздуха, принимаемая в зависимости от числа Маха.

Время обтекания объекта определяется как меньшее значение

$$t_{\text{обт}} = \min \left(\frac{2h}{C_{\text{отр}}}, \frac{B}{C_{\text{отр}}} \right),$$

где $C_{\text{отр}}$ — скорость распространения волны разрежения, равная скорости звука отраженной волны; h и B — высота и поперечный размер объекта соответственно.

На тыльной поверхности сооружения давление сначала нарастает, а затем уменьшается. Вследствие разности давлений, действу-

ющих на фронтальную и тыльную поверхности антенного сооружения, возникают смещающие силы, величина и характер которых зависят от давления во фронте ударной волны, размеров и формы конструкции. Смещающая сила в фазе дифракции определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{см}} = c_{\text{хд}} \Delta p_{\text{отр}} F \mu_{\text{д}},$$

где $c_{\text{хд}}$ — аэродинамический коэффициент конструкции при действии ударной волны; F — миделева площадь; $\mu_{\text{д}}$ — динамический коэффициент в фазе дифракции, определяемый как максимальное значение интеграла

$$\omega_0 \int_0^t \frac{\Delta p(t)}{\Delta p_{\text{ф}}} \sin \omega_0 (t - \tau) d\tau.$$

В частности, если $t_{\text{обт}} < 0,5T_0$, то

$$\mu_{\text{д}} = 0,5 - \frac{\pi}{\omega_0 \tau_{\text{эф}}} + \sqrt{A^2 + B^2 + \frac{1}{4(\omega_0 \tau_{\text{эф}})^2}},$$

где

$$A = 1 - 0,5 \frac{\sin \omega_0 t_{\text{обт}}}{\omega_0 t_{\text{обт}}};$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_{\text{эф}} + t_{\text{обт}}}{\omega_0 \tau_{\text{эф}} t_{\text{обт}}} - \frac{\cos \omega_0 t_{\text{обт}}}{\omega_0 t_{\text{обт}}} \right).$$

В фазе квазистационарного обтекания величина смещающей силы определяется по формуле

$$P_{\text{см}} = c_{\text{х}} \Delta p_{\text{скк}} F \mu_{\text{д}},$$

где $c_{\text{х}}$ — аэродинамический коэффициент при действии скоростного напора; $\mu_{\text{д}}$ — динамический коэффициент, определяемый аналогично динамическому коэффициенту при расчете ветровой нагрузки.

Расчетной смещающей силой является большая из вычисленных.

Следует отметить, что для большинства антенных конструкций критичной является фаза квазистационарного обтекания. При

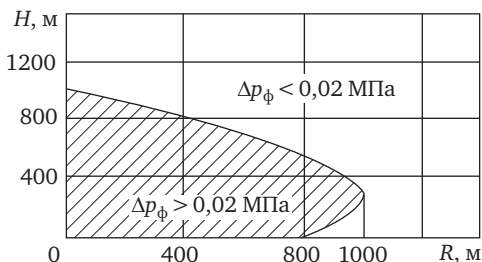


Рис. 4.19. Изобара $\Delta p_\phi = 0,02$ МПа в зависимости от высоты взрыва

этом дальность действия взрывной волны зависит как от мощности взрыва, так и от высоты, на которой был произведен взрыв.

На рис. 4.19 приведена изобара $\Delta p_\phi = 0,02$ МПа в зависимости от высоты взрыва мощностью 1000 т в тротиловом эквиваленте. Из приведенного рисунка видно следующее: во-первых, на определенной высоте ударная волна вообще не достигает земли, что связано с большим разрежением атмосферы на этой высоте; во вторых — наибольшая дальность распространения ударной волны (расстояние R) имеет место при некоторой высоте, в приведенном примере при H , равном приблизительно 300 м. При меньших высотах дальность распространения ударной волны снова снижается.

Воздействие взрывных волн в грунте

Когда на поверхности земли или на некоторой глубине происходит взрыв, в грунте могут возникать взрывные волны. В этих случаях взрыв, непосредственно действующий на массу грунта, вызывает в нем перемещение частиц и повышение давления. Другой причиной возникновения взрывных волн в грунте может быть воздушная ударная волна на поверхности земли или ударная волна взрыва в воде. Под воздействием ударной волны в грунте также возникает взрывная волна, причем на поверхности грунта давление взрывной волны равно давлению в ударной волне в воздухе или в воде. При дальнейшем распространении через грунт взрывная волна сильно видоизменяется, давление в ней заметно уменьшается, а время действия значительно возрастает. Это объясняется следующим. Грунты такого вида, как песок, глина, супесь и др., имеют определенную структуру. Частицы в грунте находятся в определенном положении друг относительно друга, а при воздействии на грунт

какой-либо силы происходит прежде всего некоторое сжатие и небольшое перемещение частиц. При этом структура грунта сохраняется. Если сила, воздействующая на грунт, возрастает, то наступает такое смещение частиц, когда они теряют свое первоначальное положение — структура грунта разрушается. При этом происходит значительное уплотнение грунта и создается новая, более плотная структура, которая обычно может выдержать очень большие нагрузки без ее дальнейшего разрушения. Описанные изменения грунта при воздействии на него тех или иных нагрузок происходят также и при прохождении через грунт взрывной волны. Наиболее быстро через грунт передаются небольшие избыточные давления. Это происходит потому, что при небольших избыточных давлениях структура грунта не разрушается, а оказывается способной передавать смещения и нагрузки с большой скоростью. Более значительные нагрузки, вызывающие разрушение структуры и сильное сжатие грунта, передаются через него медленно, поэтому большие избыточные давления распространяются в грунте обычно медленнее, чем малые избыточные давления. Мягкие грунты резко отличаются от воздуха или воды, где наблюдается как раз обратное: чем больше избыточное давление, тем быстрее оно распространяется. Таким образом, распределение избыточного давления во взрывной волне в грунте существенно отличается от распределения избыточного давления в воздухе и в воде. На рис. 4.20 приведены графики изменения избыточного давления с течением времени в воздушной ударной волне, воздействующей на грунт, и во взрывной волне на разной глубине внутри грунта. Как видно из графика, максимальные давления все более и более отодвигаются назад и уменьшаются, в то время как волна в целом все более и более растягивается. Эти особенности взрывной волны в грунтах не позволяют называть такую волну «ударной», потому что обычно ударной волной считают такую, у которой в начале ее действия избыточное давление скачкообразно возрастает до наибольшего значения, и пик давления сдвигается вперед к фронту волны.

Увеличение длительности действия взрывной волны, замедление роста избыточного давления, снижение наибольшего давления взрывной волны

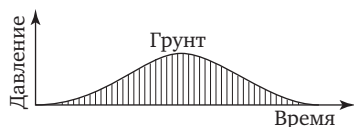


Рис. 4.20. Распределение давления во взрывной волне в грунте

приводят к снижению ее разрушающего действия. Вследствие этого сооружения, заглубленные в грунты даже всего на несколько метров, оказываются обычно хорошо защищенными от действия взрыва, происходящего в воздухе.

Несколько иначе происходит действие взрыва, если заряд взрывается внутри грунта на достаточной глубине, не менее, чем $H_k \geq 0,7\sqrt[3]{q}$, м, где q — полный тротильный эквивалент, кг.

Основная часть энергии взрыва передается окружающей массе грунта, и производит мощное сотрясение, напоминающее по своему действию землетрясение. В мягких грунтах действие волны, образующейся при подземном взрыве, характеризуется ускорением a , которое волна сообщает зданиям и сооружениям, находящимся на поверхности или внутри грунта. Это ускорение можно сравнить с ускорением g свободного падения. Тогда

$$\frac{a}{g} = \frac{45\,000}{\gamma} \frac{q}{R^3 T},$$

где γ — объемная масса грунта; q — полный тротильный эквивалент; R — расстояние от места взрыва до данной точки; T — период колебаний здания (время полного колебания).

Обычно для городских зданий T можно считать равным 0,01...0,10 с (в среднем 0,05 с). Поэтому

$$\frac{a}{g} = \frac{900\,000}{\gamma} \frac{q}{R^3}.$$

Отсюда можно определить расстояние разрушения зданий взрывной волной в грунте при подземном взрыве. Такое действие взрывной волны напоминает действие землетрясения, поэтому взрывные волны и их разрушающее действие называют сейсмическими, а соответствующую величину R — радиусом сейсмического действия. На основе предыдущей формулы получаем

$$R = 96,5 \sqrt[3]{\frac{q}{\gamma a/g}}.$$

Величина a/g , при которой начинаются значительные разрушения обычных городских и промышленных зданий, может быть принята равной 0,04.

Таким образом, радиус сейсмического действия взрыва можно считать равным

$$R = 280 \sqrt[3]{g/\gamma}.$$

Если $q = 20\,000\,000$ кг и $\gamma = 2000$ кг/м³, то $R = 6000$ м.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что сейсмическое действие атомного взрыва в мягких грунтах оказывается весьма значительным и простирается на расстояние, превосходящее расстояние соответствующего разрушающего действия воздушной ударной волны. Значение радиуса сейсмического действия в скальных породах в несколько раз меньше. Однако это справедливо для зоны сравнительно сильного действия. На более значительных расстояниях сейсмическое действие интенсивнее затухает в мягких грунтах и передается с меньшим ослаблением в скальной породе.

4.7. Совместное действие нагрузок на антенные сооружения

Коэффициенты сочетания нагрузок

Нагрузки на стационарные сооружения подразделяются на постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые).

К постоянным нагрузкам на антенные устройства и опоры относятся:

- масса постоянных частей несущих конструкций и фундаментов;
- масса оборудования, элементов и помещений, без которых не может функционировать данное сооружение;
- масса механизмов, приводящих в движение антенные устройства, и масса автоматических устройств, управляющих их движением;
- воздействие предварительного напряжения элементов конструкций;
- масса и давление грунта.

К длительным нагрузкам относятся:

- масса частей сооружения, которые в процессе эксплуатации могут изменяться (временные площадки, лестницы, перегородки и др.);

- масса оборудования, которое в процессе эксплуатации может изменять положение или модернизироваться;

- средние скорости ветра, при которых наиболее часто возможно повреждение сооружения или его частей, если вращение или перемещение непрерывны при их эксплуатации.

К кратковременным нагрузкам относятся:

- ветровые максимальной интенсивности;
- обледенение (гололед);
- изменение температуры в пределах одних суток, а также изменение температуры от солнечной радиации;

- осадки (снег, дождь, отложения пыли);
- инерционные нагрузки, возникающие при быстрых вращениях или перемещениях сооружения (переброска в новое положение);

- вес людей, инструментов, временного оборудования, мебели;
- нагрузки, возникающие при перевозке и возведении сооружения;

- воздействия подвешного подъемно-транспортного оборудования.

К особым временным нагрузкам и воздействиям относятся:

- сейсмические и взрывные;
- неисправность или поломка оборудования;
- неравномерность осадки основания.

В зависимости от срока службы стационарные сооружения делятся на три класса капитальности:

I класс — срок службы 50 лет;

II класс — срок службы 25 лет;

III класс — срок службы 10 лет.

К I классу капитальности относятся сооружения, имеющие особое важное значение, объекты, моральное старение которых весьма мало, а также некоторые сооружения, предназначенные для комплексного использования. Коэффициент перегрузки для них $n_{\text{п}} = 1,4$.

Ко II классу капитальности относятся наиболее распространенные сооружения, предназначенные для выполнения функциональных задач. Коэффициент перегрузки для них $n_{\text{п}} = 1,3$.

К III классу капитальности относятся временные и перевозимые сооружения. Коэффициент перегрузки для них $n_{\text{п}} = 1,2$. В процессе

эксплуатации сооружение может быть подвержено одновременно действию нескольких видов нагрузжений, поэтому его необходимо рассчитывать на определенное сочетание нагрузок.

При расчете на сочетание нескольких нагрузок вводится приведенное расчетное значение, учитывающее малую вероятность совпадения неблагоприятных значений различных нагрузок. Кроме того, если нагрузки временные, то учитывается вероятность совпадения неблагоприятных значений различных нагрузок. При расчете на сочетание нескольких нагрузок вводится приведенное расчетное значение, учитывающее малую вероятность совпадения неблагоприятных значений различных нагрузок. Кроме того, если нагрузки временные, то учитывается вероятность совпадения их во времени. Для этого вводят коэффициенты сочетаний, понижающих расчетное значение нагрузок.

Коэффициент сочетаний η_c для наиболее вероятных и характерных взаимодействий нагрузок приведен в табл. 4.14. Если для данного вида сооружения установлено наиболее неблагоприятное сочетание нагрузок и воздействий, то расчет проводят только на него.

Расчет усилий и деформаций при совместном действии нагрузок

Расчетное значение каждой из нагрузок принимает такие значения, которые соответствуют заданной обеспеченности. Если действует одна нагрузка, то внутреннее усилие, принимается как функция этой нагрузки, имеет ту же обеспеченность, что и расчетная нагрузка. При действии на конструкцию нескольких нагрузок усилие, полученное простым суммированием усилий от каждой из расчетных нагрузок, имеет большую обеспеченность, разную для различного числа нагрузок. Уточненная методика позволяет определить расчетные усилия от нескольких нагрузок с обеспеченностью, равной обеспеченности расчетных нагрузок.

При разработке норм принято следующее: нагрузки представляют собой независимые случайные величины, расчетные нагрузки различных видов имеют одинаковую обеспеченность. Обеспеченность расчетного значения нагрузки полностью определяется числом стандартов этой нагрузки.

В случае действия одной нагрузки ее расчетная величина составляет

$$q_{pi} = n_i q_{ni} = q_{ni} \pm \gamma \delta_{qi},$$

где δ_{qi} — стандарт i -й нагрузки; γ — характеристика безопасности (число стандартов); n_i — коэффициент перегрузки i -й нагрузки; q_{ni} — нормативная нагрузка, условно принимаемая за математическое ожидание.

В данной формуле знак минус принимается в том случае, когда опасность представляет не перегрузка конструкции, а ее недогрузка.

4.14. Сочетания нагрузок

Сочетание	Комбинации в сочетаниях	Коэффициенты сочетания нагрузок									
		Масса	Предваритель- ное напряжение	Ветер	Обледенение (гололед)	Снег	Температура	Инерционные средние	Сейсмические	Вызываемые неисправностью	Монтажные
Основное	1	1	1,1	1							
	2	1	1	0,25	1	1*					
	3	1	1	1		1*					
	4	1	1	0,9			0,9				
	5	1	1	0,9						0,9	
	6	1	1	0,25				1			
	7	1	1	0,5**							
Особое	1	1	1,1								
	2	1	1	0,25					1		1
	3	1	1	0,25						1	
	4	1	1	0,8	0,8					1	
	5	1	1	0,25	0,25			1			
	6	1	1	0,25**	0,55**			1			

*Только в элементах площадью более 15 м².

** Значение может быть уточнено в задании.

Усилие определяется как линейная функция нагрузки:

$$X_{pi} = \beta_i q_{pi} = \beta_i q_{ni} \pm \beta_i \gamma \sigma_{qi} = X_{ni} \pm \gamma \sigma_{xi} = n_i X_{ni},$$

где X_{ni} , X_{pi} , σ_{xi} — соответственно усилие от нормативной и расчет-

ной i -й нагрузки и его стандартное значение; β_i — коэффициент пропорциональности между усилием и нагрузкой.

Из приведенного выражения получаем стандарт усилия

$$\sigma_{xi} = \left| \frac{X_{ni}(n_i - 1)}{\gamma} \right|. \quad (4.24)$$

Принимая для суммарного усилия при действии нескольких нагрузок ту же обеспеченность, что и для каждой расчетной нагрузки, получаем

$$X_p = X_n \pm \gamma \sigma_x, \quad (4.25)$$

где X_n , X_p , σ_x — соответственно суммарное усилие от нормативных и расчетных нагрузок и его стандартное значение.

Если нагрузки (а следовательно, и усилия от них) — независимые случайные величины, то

$$X_n = \sum_{i=1}^m X_{ni}; \quad \sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\sigma_{xi})^2}, \quad (4.26)$$

где m — число учитываемых в расчете нагрузок.

Подставляя (4.24) и (4.26) в (4.25), получаем

$$X_p = \sum_{i=1}^m X_{ni} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ni}^2 (n_i - 1)^2}. \quad (4.27)$$

Расчетное усилие, полученное простым суммированием усилий от каждой расчетной нагрузки

$$X_p^* = \sum_{i=1}^m X_{pi} = \sum_{i=1}^m X_{ni} \pm \sum_{i=1}^m X_{ni} (n_i - 1). \quad (4.28)$$

Так как среднеквадратичное значение меньше среднеарифметического (при $m \geq 2$), то расчет с применением формулы (4.27) всегда ведет к экономии материала по сравнению с применением формулы (4.28).

Если нагрузки вызывают различные усилия, учитываемые в расчете совместно (например нормальную силу и изгибающий момент), то эти усилия, вызываемые каждой отдельной нагрузкой, связаны функциональной зависимостью. При действии нескольких независимых нагрузок результирующее усилие различных

видов связываются не с функциональной, а с вероятностной зависимостью, «теснота» которой уменьшается с увеличением числа нагрузок.

Вероятностную зависимость двух усилий (например, изгибающего момента M и нормальной силы N) можно приближенно представить в виде прямых регрессий M на N или N на M .

Используя регрессию M на N , выражаем среднее ожидаемое значение момента $\bar{M}_p$, соответствующее расчетному значению нормальной силы N_p :

$$\bar{M}_p = M_H + r_{mn} \frac{\sigma_m}{\sigma_n} (N_p - N_m), \quad (4.29)$$

где r_{mn} — коэффициент корреляции суммарных усилий.

Нормальная сила

$$N_p = \sum_{i=1}^m N_{mi} \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n N_{mi}^2 (n_i - 1)^2}. \quad (4.30)$$

Из (4.29) с учетом (4.24), (4.26) и (4.30), находим

$$\begin{aligned} N_p - N_H &= \pm \gamma \sigma_N; \\ \bar{M}_p &= M_H \pm r_{mn} \gamma \sigma_M; \\ \bar{M}_p &= \sum_{i=1}^m M_{Hi} \pm r_{MN} \sqrt{\sum_{i=1}^m M_{Hi}^2 (n_i - 1)^2}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Для определения коэффициента корреляции запишем выражение корреляционного момента

$$K_{MN} = r_{MN} \sigma_M \sigma_N. \quad (4.32)$$

При действии нескольких независимых нагрузок

$$K_{MN} = \sum_{i=1}^m K_{MiNi} = \sum_{i=1}^m r_{MiNi} \sigma_{Mi} \sigma_{Ni}. \quad (4.33)$$

Учитывая, что усилия, вызываемые одной нагрузкой, связаны функциональной зависимостью, т.е. $r_{MiNi} = 1$, из (4.30) и (4.31) с использованием (4.25) и (4.27) получаем:

$$r_{MN} = \frac{K_{MN}}{\sigma_M \sigma_N} = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_{Mi} \sigma_{Ni}}{\sigma_M \sigma_N} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{Ni} N_{Mi} (n_i - 1)^2}{\gamma^2 \sigma_M \sigma_N};$$

$$r_{MN} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{\text{H}}^i N_{\text{H}}^i (n_i - 1)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^m M_{\text{H}}^2 (n_i - 1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m N_{\text{H}}^2 (n_i - 1)^2}}. \quad (4.34)$$

Следовательно,

$$\bar{M}_{\text{P}} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{\text{H}} \pm \sum_{i=1}^m M_{\text{H}}^i N_{\text{H}}^i (n_i - 1)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^m N_{\text{H}}^2 (n_i - 1)^2}}. \quad (4.35)$$

Аналогично, используя регрессию N на M , можно выразить ожидаемое среднее значение нормальной силы $\bar{N}_{\text{p}}$, соответствующее расчетному значению момента M_{p} . Данный подход легко обобщается для случая, когда одни и те же нагрузки вызывают в сечении три усилия. Применение уточненной методики дает снижение расчетного усилия при учете двух нагрузок до 4%, при учете трех нагрузок — около 6...7%. При использовании формул уточненной методики необходимо нормативное значение нагрузок принять с коэффициентом сочетаний.

Элементы технической аэродинамики

Уравнение состояния газов

Процессы в воздухе и газах, связанные с аэродинамическими исследованиями, являются в большинстве случаев тепловыми, т.е. такими, в которых под влиянием различных факторов происходит изменение скорости молекулярного движения, воспринимаемое нами как изменение температуры, являющейся мерой средней кинетической энергии этого движения. Для исследования подобных процессов обычно достаточно знать давление, плотность и температуру газов, от изменения которых зависят изменения и других параметров, например, вязкости, теплопроводности, электрических характеристик и т. д. Не следует, однако, считать, что при одинаковых температурах, давлениях и плотностях физические свойства всех газов одинаковы. Эти свойства зависят от природы газа, его химической структуры, числа атомов в молекуле, молекулярной массы и т.п.

Уравнением состояния называется зависимость давления p от удельного объема V и температуры T . Это уравнение получается наиболее простым, если плотности не очень велики, и газы с большой точностью подчиняются законам Бойля—Мариотта и Гей-Люссака.

Уравнение состояния связывает между собой три основные величины или три параметра, определяющие состояние газа: давление p , плотность ρ , температуру T . Изменение одного из параметров влечет за собой изменение остальных, т. е. изменение состояния газа. Изменение состояния газа может произойти при подведении к нему тепла (например, в двигателях внутреннего сгорания), при отводе тепла от газа, а также при совершении газом (или приложе-

нии к газу) работы. Например, газ, расширяясь, перемещает поршень в цилиндре двигателя и производит работу, преодолевая силы внешнего давления на поршень; при этом давление в газе падает. Если приложить к газу работу, сжимая его поршнем, то увеличатся давление и плотность газа. Таким образом, изменение состояния газа может происходить либо за счет подвода или отвода тепла, либо при выполнении газом или приложении к нему работы, либо при одновременном действии обоих факторов. Иными словами, изменение состояния газа может быть достигнуто сообщением газу или отнятием от него механической или тепловой энергии, либо той и другой одновременно.

Изменение тепловой энергии характеризуется количеством тепла, подведенным к газу или отведенным от него, и определяется через изменение (приращение) температуры газа и удельную теплоемкость. Твердые тела и жидкости имеют одно вполне определенное значение удельной теплоемкости. В частности, удельная теплоемкость воды равна 1 ккал/(кг·град). Для газов удельная теплоемкость зависит от того, происходит ли нагревание при постоянном давлении или постоянном объеме газа. При этом удельная теплоемкость при постоянном давлении C_p всегда больше удельной теплоемкости при постоянном объеме C_v . Это объясняется тем, что при одинаковом повышении температуры одна и та же масса газа воспримет больше тепла в том случае, когда помимо нагревания происходит еще и расширение газа, так как в этом случае тепло расходуется не только на увеличение внутренней энергии газа, но и на работу расширения.

В аэромеханике больших скоростей существенное значение имеет отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме, т.е. величина $\chi = C_p/C_v$. Для воздуха $\chi = 1,40$. Это же значение χ имеют почти все двухатомные газы.

Процесс, происходящий без теплообмена между газом и окружающей средой, называется *адиабатическим*. Такие процессы имеют исключительно большое значение в газовой динамике. Так как подвод (и отвод) тепла при этом отсутствует, то в соответствии с первым началом термодинамики работа расширения будет сопровождаться охлаждением газа, а в случае сжатия внутренняя энергия будет увеличиваться за счет затраченной работы, температура газа при этом будет увеличиваться.

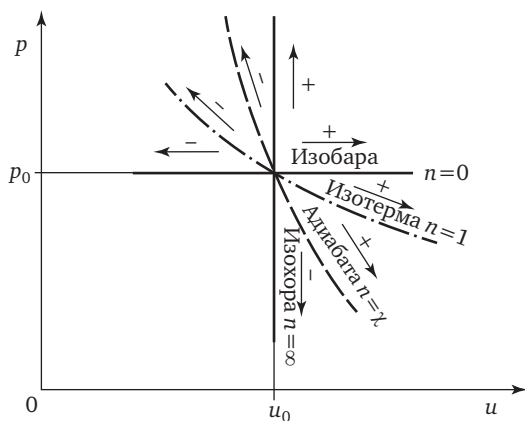


Рис. 1. Схема зависимости давления от удельного объема

На практике весьма трудно осуществить абсолютно нетеплопроводную оболочку, однако быстро протекающие процессы сжатия или расширения весьма близки к адиабатическим. Например, такт сжатия в двигателях внутреннего сгорания происходит столь быстро, что за это время газовая смесь не успевает передать какое-либо значительное количество тепла стенкам цилиндра.

Рассматривая зависимость давления от удельного объема для изохорического и изотермического процессов (рис. 1), можно заметить, что во всей области между ними будут лежать такие процессы, которые требуют либо отвода тепла (близкие к изохорическому), либо его подвода (близкие к изотермическим). Все эти разнообразные процессы называются политропическими, и их можно выразить уравнением вида

$$pV^n = \text{const},$$

где n — показатель политропы.

Адиабатический процесс графически расположен между изохорой и изотермой и также может быть выражен подобного рода уравнением с показателем степени $n = \chi = 1,4$ (для воздуха):

$$pV^\chi = \text{const} = p_0 V_0^\chi$$

или

$$p/p_0 = (V_0/V)^\chi = (\rho/\rho_0)^\chi.$$

Выражение $pV^\chi = p_0 V_0^\chi$ может быть записано в виде $p/\rho^\chi = p_0/\rho_0^\chi$, так как $V = 1/\rho$.

Связь между параметрами при адиабатическом процессе может быть найдена с помощью уравнения состояния для начала и конца процесса:

$$p_0 V_0 = RT_0; pV = RT$$

и имеет вид

$$p/p_0 = (T/T_0)^{\chi/\chi-1} = (\rho/\rho_0)^\chi.$$

Существуют процессы, происходящие с другими показателями политропы n . Так, при истечении горячих газов из сопла жидкостного реактивного двигателя процесс считается политропическим с показателем $n = 1,2$; он ближе к изотерме, чем адиабата из-за подвода некоторого количества тепла вследствие догорания топлива внутри сопла.

Уравнение неразрывности

При экспериментальном изучении сложных явлений, связанных с обтеканием тел газом, большую пользу приносят вспомогательные образы аэромеханики — линии тока, трубки тока, струйка и др., с помощью которых легче представить себе картину течения. Особенно важным понятием аэромеханики является *струйка газа* или жидкости.

Если зафиксировать путь какой-либо частицы газа или жидкости в пространстве в виде некоторой линии, то такая линия называется *траекторией частицы*. Она показывает путь частицы с течением времени, т.е. «историю» частиц. В каждый момент времени каждая частица имеет определенную по величине и направлению скорость.

Общая картина скоростей в данный момент времени в пространстве, заполненном газом, называется *полем скоростей*. Его можно охарактеризовать так называемыми «*линиями тока*», т.е. линиями, в каждой точке которых в данный момент векторы скорости газа к ней касательны. Линии тока (рис. 2, 3) дают как бы фотографический снимок распределения в газе векторов скоростей частиц в каждый момент, что позволяет наглядно представить распределение скоростей во всем пространстве, занимаемом газом или жидкостью. С течением времени линии тока могут менять свою форму в зависимости от того, является ли движение установившимся или

неустановившимся. Движение газа, при котором в любой точке занятого газом пространства параметры (скорость, плотность, температура и др.) не меняются с течением времени, называется стационарным, или установившимся*.

Линии тока при установившемся движении все время сохраняют свою форму и совпадают с траекториями частиц. Если с течением времени параметры газа в любой данной точке меняются, то движение является неустановившимся. В этом случае формы линий тока будут меняться по времени. Таким образом, при неустановившемся движении параметры меняются не только от точки к точке, но и по времени. Примером неустановившегося движения может служить распространение звуковых волн, а также движение воды за веслом лодки.

В аэромеханике во многих практических случаях встречаются установившиеся движения: движение в нефтегазопроводах, полет различных аппаратов с постоянной скоростью и др. В дальнейшем, если это особо не оговорено, будем рассматривать только установившееся движение газа.

Если в установившемся потоке газа выделить весьма малый замкнутый контур (см. рис. 2) и провести через него все линии тока, то часть газа, ограниченная этими линиями, называется элементарной трубкой (или струйкой) тока.

Так как трубка образована линиями тока и, следовательно, скорость любой частицы газа, лежащей на трубке, касательна к ее по-

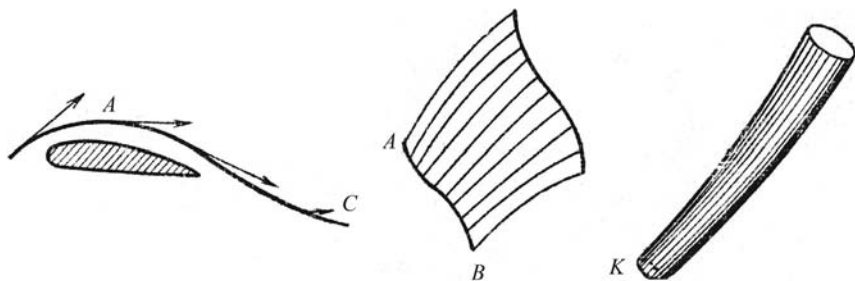


Рис. 2. Линии тока распределения векторов скоростей

* Через любую точку все время проходят новые частицы, но в момент прохождения через данную точку пространства все они имеют одинаковые параметры. При этом в разных точках значения параметров могут быть различными, но от времени они не зависят.

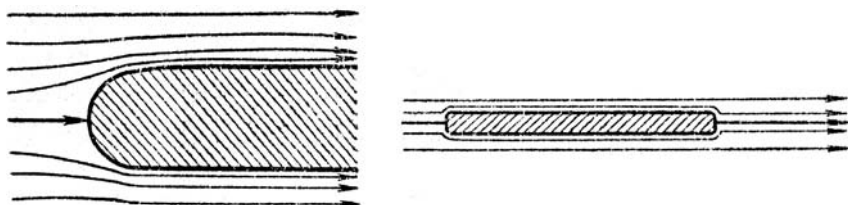


Рис. 3. Схема образования трубки линии тока

верхности, то через боковую поверхность струйки (ее стенки) газ не может протекать ни внутрь, ни наружу.

Это позволяет считать каждую струйку текущей как бы изолированно. Удобство такого рассмотрения состоит в том, что всякий поток можно разбить на отдельные струйки, представляющие собой пучок траекторий частиц жидкости.

К отдельной струйке можно применить закон сохранения материи и закон сохранения энергии, на основании которых выведены два главных уравнения аэромеханики: уравнение неразрывности и уравнение Бернулли. Переходя затем от отдельных струек к потоку в целом, можно получить суммарную картину явлений, происходящих при обтекании тел жидкостью или газом. В аэромеханике принято при изучении обтекания тел «обращать движение», т.е. вместо того, чтобы двигать с постоянной скоростью тело, рассматривают его как неподвижное, а поток — набегающим на него со скоростью, равной по величине и противоположно направленной скорости движения тела. Этот прием применяется как метод рассуждения в теоретической аэромеханике и реально осуществляется в экспериментальной при опытах в аэродинамических трубах. Допущение обращения движения следует из принципа относительности Галилея, согласно которому при установившемся поступательном движении тела в некоторой среде (например, воздухе) силы, действующие на тело, зависят только от относительной скорости движения тела и среды (рис. 4).

В экспериментальной аэромеханике уравнение неразрывности используется в форме зависимости

$$m_1 = m_2 = m = \text{const},$$

где $m_1 = \rho_1 F_1 u_1$; $m_2 = \rho_2 F_2 u_2$.

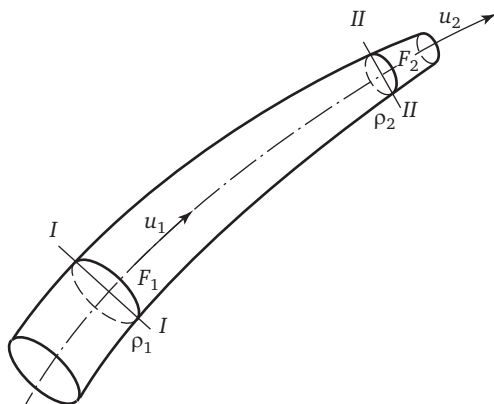


Рис. 4. Схема к выводу уравнения неразрывности

В любом сечении масса жидкости, проходящая через любое сечение в единицу времени, постоянна, или массовый расход постоянен. При этом пренебрегают радиальными составляющими скорости, что во многих случаях вполне допустимо.

Учитывая, что $\rho = \gamma/g$, получим

$$\gamma_1 F_1 u_1 = \gamma_2 F_2 u_2 = \text{const} = G,$$

где $G = mg$ — массовый секундный расход.

Для несжимаемой жидкости $\gamma_1 = \gamma_2$, поэтому уравнение массового расхода примет вид

$$F_1 u_1 = F_2 u_2 = \text{const} = U,$$

где U — объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$.

Из равенства $F_1 u_1 = F_2 u_2$ следует, что для несжимаемой жидкости $u_1/u_2 = F_2/F_1$, т.е. скорости в любых поперечных сечениях трубки обратно пропорциональны площади этих сечений. Следует, однако, помнить, что уравнение постоянства объемного расхода, строго говоря, применимо только к несжимаемому газу. Для сжимаемых газов плотность при движении с большими скоростями может меняться, поэтому пользоваться указанным уравнением можно лишь в тех случаях, когда изменением плотности можно пренебречь.

Уравнение неразрывности в простейшем виде находит широкое применение в экспериментальной аэромеханике для решения задач по определению распределения скоростей и давлений вдоль

различного рода каналов, трубопроводов, выбору их геометрической формы и т.п.

Уравнение Бернулли

Уравнение Бернулли выводится для установившегося течения газа и выражает закон сохранения энергии применительно к газу, текущему в нетеплопроводной трубе (рис. 5). Рассматривая адиабатическое течение, т. е. такое, при котором энергия не подводится к газу и не отводится от него, а лишь переходит из одного вида в другой, можно записать равенство энергии на единицу массы, внесенной текущим газом в какой-либо участок ($I—I'—II—II'$), и энергии, унесенной газом из этого же участка, и получить уравнение для газа с учетом его сжимаемости (уравнение Бернулли):

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{\chi}{\chi-1} \frac{p_1}{\rho_1} + gz_1 = \frac{u_2^2}{2} + \frac{\chi}{\chi-1} \frac{p_2}{\rho_2} + gz_2 = \text{const.}$$

Величину

$$i = \frac{\chi}{\chi-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{\chi}{\chi-1} \frac{a^2}{\chi-1}$$

называют теплосодержанием (термической энергией, или энтальпией). В этом случае

$$\frac{u_1^2}{2} + i_1 + gz_1 = \frac{u_2^2}{2} + i_2 + gz_2.$$

Если труба горизонтальна, то $z_1 = z_2$, и уравнение Бернулли примет вид:

$$\frac{u_1^2}{2} + i_1 = \frac{u_2^2}{2} + i_2 = \text{const} \quad (\text{для воздуха } u^2 + 2010T = \text{const}).$$

Если труба нетеплопроводна, но между стенками трубы и текущим газом имеется трение, то кинетическая энергия за счет потерь на трение и перехода ее в тепло уменьшится, а теплосодержание газа увеличится так, что полная энергия, проносимая через трубу, не изменится.

Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости. Для несжимаемой и невязкой жидкости изменения внутренней энергии не происходит, так как в условиях отсутствия отвода и подвода тепла

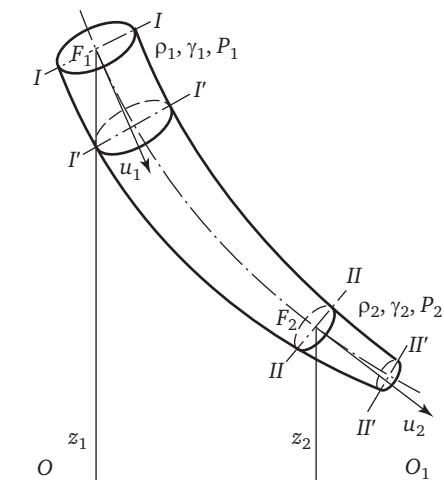


Рис. 5. Схема к выводу уравнения Бернулли

не может изменяться содержащееся в нем тепло. Уравнение Бернулли в этом случае имеет вид ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$):

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2$$

или, с учетом потерь на трение (ξ — коэффициент потерь),

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \xi \frac{u_1^2}{2}.$$

Умножив полученное выражение на ρ с учетом, что $g\rho = \gamma$, получим:

$$\rho \frac{u_1^2}{2} + p_1 + \gamma z_1 = \rho \frac{u_2^2}{2} + p_2 + \gamma z_2 + \xi \rho \frac{u_1^2}{2},$$

где $\rho u^2/2$ — скоростной напор или динамическое давление; p — статическое давление; γz — гидростатическое давление; $\xi \rho u_1^2/2$ — потерянный напор.

Сумма динамического, статического, гидростатического и потерянного давлений называется полным давлением H .

Для горизонтальной трубы при отсутствии потерь имеем

$$\rho \frac{u^2}{2} + p + H = \text{const.}$$

В последнем виде уравнение Бернулли можно применять как для струйки, так и для всего потока.

Приложения уравнения неразрывности и уравнения Бернулли

Рассмотрим некоторые приложения уравнений неразрывности и Бернулли применительно к различным аэромеханическим задачам, имеющим большое практическое значение.

Критическая точка. При обтекании потоком любого тела струйки газа разделятся на две части: одна обтекает тело сверху, другая — снизу. Между этими частями потока всегда будет находиться такая струйка, которая их разграничивает. Она не отклоняется ни вверх, ни вниз, а, подходя к телу по нормали, при ударе о тело полностью потеряет свою кинетическую энергию. Точка тела, в которой скорость потока обращается в ноль, называется *критической точкой* и обозначается обычно через K (рис. 6).

Давление в критической точке (давление торможения). Для несжимаемой жидкости давление в критической точке может быть найдено с помощью уравнения Бернулли для сечений I и II (см. рис. 6.):

$$\rho \frac{u_1^2}{2} + p_1 = \rho \frac{u_2^2}{2} + p_2,$$

но так как $u_2 = 0$, то давление в критической точке

$$p_2 = p_1 + \rho \frac{u_1^2}{2} = p_1 + q = H.$$

Таким образом, давление в критической точке равно полному

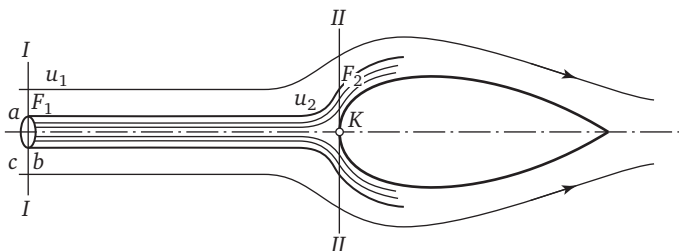


Рис. 6. Схема обтекания тела потоком воздуха

давлению, т.е. сумме статического и динамического. Если рассматривать избыточное давление в критической точке (превышающее статическое давление p_1), то оно окажется равным

$$p_2^1 = p_2 - p_1 = \rho \frac{u^2}{2} = q.$$

Часто эту формулу пишут без индекса, понимая под u скорость газа вдали от тела, тогда

$$q = \rho \frac{u^2}{2}.$$

Это избыточное давление называют динамическим, а полное давление в критической точке — давлением торможения. Давление торможения

$$p_{\text{торм}} = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}.$$

Распределение давления по поверхности тела

Рассмотренные примеры приложения теоремы Бернулли показывают огромное ее значение для решения различных аэромеханических задач. Круг этих задач значительно расширяется, если использовать и уравнение неразрывности, и уравнение Бернулли. На основании уравнения неразрывности, зная форму струек, легко определить, где скорости больше, а где меньше. Зная распределение скоростей около тела, можно, применяя теорему Бернулли, найти распределение давлений и на этом основании — силы, действующие на тело.

Связь между распределением давления и скоростью. Для случая обтекания несжимаемой жидкостью любого тела можно написать выражение для избыточного давления $p - p_0$ на теле в зависимости от скорости u на нем и скорости набегающего потока u_0 :

$$p - p_0 = \rho \frac{u_0^2}{2} - \rho \frac{u^2}{2} \quad \text{и} \quad \bar{p} = \frac{p - p_0}{q_0} = 1 - \frac{u^2}{u_0^2},$$

откуда

$$\frac{u^2}{u_0^2} = 1 - \bar{p} \quad \text{и} \quad u = u_0 \sqrt{1 - \bar{p}}.$$

Таким образом, зная распределение давления (p) по телу, можно по этой формуле найти распределение скоростей, а распределение давления проще измерить экспериментально. Поэтому опыты по нахождению распределения давления очень распространены в аэромеханике, так как они дают возможность сравнительно простыми способами определить распределение скоростей. Проводятся такие опыты по следующей схеме. Сечение тела, в котором надо узнать распределение давления, дренируется, и от дренажных точек (отверстий) давление подводится к манометрам, измеряющим давление, действующее по нормали к телу (по оси дренажного отверстия). Изменяя скорости и углы установки тела относительно потока, можно найти значение давления при различных условиях обтекания.

Пограничный слой

Ламинарный и турбулентный пограничные слои. До сих пор рассматривалось, главным образом, движение идеальной жидкости, т. е. жидкости, не имеющей внутренних сил трения. Силы внутреннего трения, или вязкость, существуют у всех реальных жидкостей и газов. В результате их влияния все строгие выводы, сделанные для идеальной жидкости, для реальных жидкостей и газов являются приближенными, нуждающимися в некоторых поправках и уточнениях. Одной из главных задач аэромеханики (в частности, экспериментальной) и является определение поправок в теорию, которые вносят силы вязкости жидкостей или газов.

Силы вязкости стремятся затормозить быстро движущиеся частицы жидкости и ускорить движение более медленных частиц. Они являются в основном тангенциальными силами и особенно велики там, где жидкость течет слоями с большой разностью скоростей. Вязкость служит причиной образования вихрей, весьма существенно влияющих на течение жидкостей или газов, но образовавшиеся вихри из-за вязкости постепенно рассасываются.

Если поместить жидкость между двумя параллельными пластинами и придать верхней скорость u (рис. 7), то наблюдения позволяют установить следующее:

- жидкость «прилипает» к поверхностям так, что частицы, которые непосредственно прилегают к пластинам, имеют скорости, равные скоростям пластины;

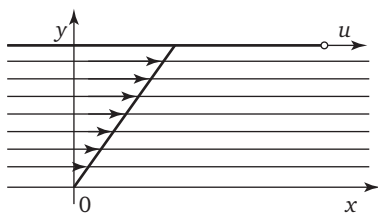


Рис. 7. Распределение скоростей в потоке жидкости

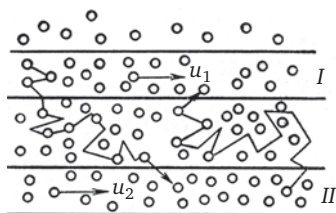


Рис. 8. Схема скоростей в пограничном слое жидкости

- скорость жидкости между пластинами по нормали к ним изменяется по линейному закону;
- внутреннее трение жидкости оказывает сопротивление движению, пропорциональное градиенту скорости.

Аналогичные опыты показывают, что при обтекании тела жидкостью на самой поверхности тела жидкость неподвижна, она «прилипает», а на некотором малом расстоянии от него приобретает уже скорость, сравнимую с местной скоростью обтекания (рис. 8). Этот тонкий слой, в котором происходит нарастание скорости от нуля до местной скорости обтекания, называется *пограничным слоем*.

Вязкость в жидкостях и газах является следствием их молекулярного строения. Молекулы газов и жидкостей по кинетической теории обладают вполне определенными средними скоростями беспорядочного движения, зависящими лишь от температуры. В каждом более быстро движущемся слое *I* (см. рис.8) молекулы имеют, кроме скорости беспорядочного молекулярного движения, еще и добавочную упорядоченную скорость общего поступательного движения. Таким образом, скорость молекул в слое *I* будет больше, чем скорость в слое *II*. При перемешивании слоев более быстро движущиеся молекулы, попадая в медленный слой *II*, передают молекулам этого слоя некоторый импульс и начинают их ускорять, а сами затормаживаться. И наоборот, «медленные» молекулы, попадая в быстрые слои, будут их затормаживать, а сами несколько ускоряться.

Ньютон предположил, а дальнейшие исследования подтвердили это предположение, что силы вязкости dX , действующие вдоль двух близко расположенных площадок (или слоев) в пограничном слое жидкости (рис. 9) равны

$$dX = -\mu \left(\frac{du}{dy} \right) dS,$$

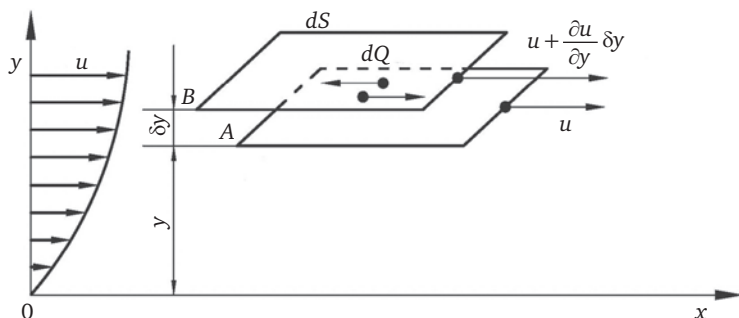


Рис. 9. Схема определения силы вязкости в пограничном слое жидкости

где μ — динамический коэффициент вязкости, характеризующий физические свойства жидкости; dS — площадь; du/dy — градиент скорости по нормали к поверхности тела.

Силы, действующие на две соседние площадки, равны по величине, но противоположно направлены.

Если разделить силу dX на площадь dS , то получим напряжение сил вязкости

$$\tau = \frac{dX}{dS} = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0}.$$

Это напряжение направлено вдоль площадки и поэтому является тангенциальным (касательным).

Коэффициент вязкости — величина размерная:

$$[\mu] = - \frac{dX/dS}{du/dy} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

При рассмотрении течения жидкости или газов часто приходится сопоставлять силы вязкости, зависящие от динамического коэффициента вязкости μ , с силами инерции, пропорциональными массовой плотности ρ . Поэтому целесообразно ввести еще один коэффициент вязкости — кинематический $\nu = \mu/\rho$, $\text{м}^2/\text{с}$, характеризующий ускорение единичной массы от сил вязкости.

На практике μ определяют в большинстве случаев вискозиметрами, измеряя расход жидкости через волосные или капиллярные трубки, течение в которых подчиняется закону Пуазейля. Течение Пуазейля — это течение вязкой жидкости по трубке малого

диаметра. При рассмотрении в стеклянной трубке течения воды, к которой подмешаны небольшие твердые взвешенные частицы, можно при значительной скорости течения заметить, что наряду с главным движением в направлении оси трубки ясно видны побочные движения частиц в направлении, нормальном к оси трубки. Если скорость движения в трубке уменьшать, то при некоторой скорости станет видно, что частицы жидкости движутся отдельными слоями по траекториям, параллельным друг другу и стенкам. Такое течение называется *ламинарным*. Если рассматривать ламинарное течение в трубке столь малого диаметра, что толщина пограничного слоя будет больше радиуса, то пограничный слой сомкнется на оси и заполнит всю трубку. Закон изменения скорости по радиусу определяется формулой Пуазейля:

$$u = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2),$$

где l — расстояние рассматриваемого сечения от начала трубки; Δp — перепад давления, под действием которого происходит течение; R — радиус трубки; r — переменный радиус.

Из этой формулы следует, что скорость течения изменяется по параболическому закону. Такое течение называется *течением Пуазейля*.

Под влиянием вязкости (внутреннего трения) скорость газа на поверхности обтекаемой пластинки становится равной нулю. При удалении от пластинки по нормали к ее поверхности скорость возрастает до величины, соответствующей скорости невозмущенного потока u_0 . То же самое происходит и при обтекании других тел, несмотря на то, что скорость вдоль них может меняться.

В ламинарном пограничном слое течение происходит несмешивающимися слоями (рис. 10), но при этом поток завихрений и пограничный слой называют также слоем поверхностного завихрения. Несмотря на то, что частицы в этом слое вращаются, поперечного их перемешивания не происходит.

Если течение в пограничном слое сопровождается беспорядочным движением частиц и их перемешиванием в поперечном направлении (перпендикулярном направлению потока), то такой пограничный слой называется *турбулентным*. Отдельные

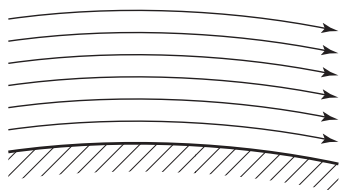


Рис. 10. Схема ламинарного пограничного слоя

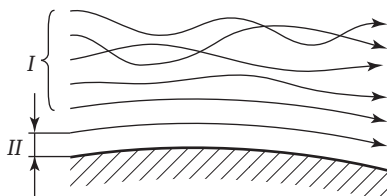


Рис. 11. Схема турбулентного пограничного слоя

частицы в этом слое описывают сложные криволинейные траектории, не совпадающие с линиями тока осредненного течения (рис. 11).

Состояние течения в пограничном слое и связанное с этим сопротивление трения движению, а также все аэродинамические свойства обтекаемых тел зависят от числа Рейнольдса, характеризующего отношение инерционных сил к силам трения.

Если в потоке имеется начальная турбулентность, то, как показывают опыты, ламинарная часть пограничного слоя на теле резко сокращается, так как ламинарный слой мало устойчив, и начальная турбулентность потока его легко «раскачивает». Сопротивление трения у пластинки, профиля крыла и подобных тел при этом сильно возрастает. Увеличивается также и общее лобовое сопротивление c_x .

Однако не всегда возрастание начальной турбулентности увеличивает сопротивление тела. Увеличение сопротивления получается у таких тел, главной составляющей которых является трение, а не сопротивление, вызываемое силами давления. К хорошо обтекаемым телам относятся пластинки, поставленные ребром к потоку, фюзеляжи и крылья самолетов, корпуса ракет, дирижаблей, кораблей и др. У таких тел трение достигает 70...80% от общего сопротивления.

У тел, сопротивление которых зависит главным образом от давлений (сопротивления формы), вызываемых отрывом пограничного слоя, в турбулентном потоке иногда создается меньшее сопротивление, чем в ламинарном потоке. Примером таких тел является шар (рис. 12). Его коэффициент c_x в значительной степени зависит от числа Рейнольдса. Падение коэффициента сопротивления происходит одновременно с переходом пограничного слоя из ламинар-

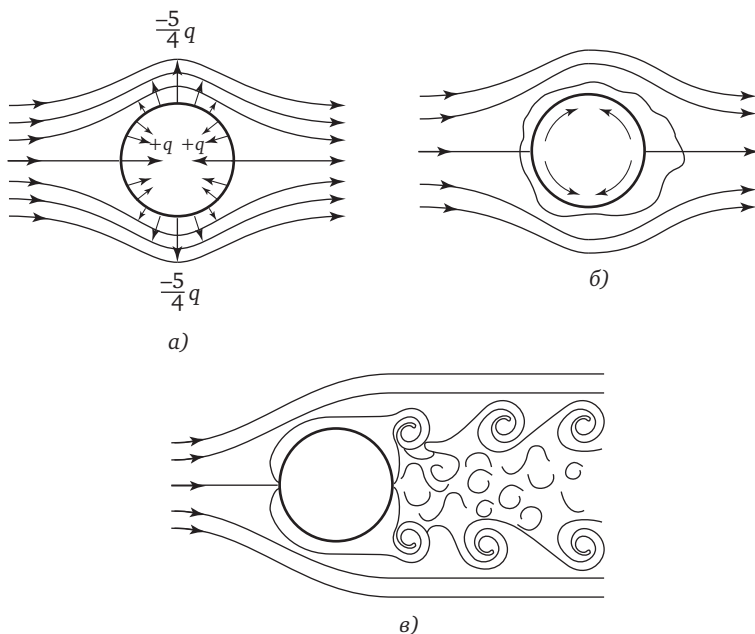


Рис. 12. Схема обтекания шара:

а — начальный момент; *б* — промежуточный момент; *в* — момент отрыва

ного состояния в турбулентное. При малых числах Re ламинарный пограничный слой у шара отрывается от его поверхности почти по наибольшему поперечному сечению (диаметру).

В первый момент поток обтекает шар без срывов (рис. 12, *а*), впереди и сзади него получается повышенное давление, а по поперечному к потоку — экватору — пониженное, т. е. картина обтекания такая же, как для случая идеальной жидкости. В следующее мгновение пограничный слой начинает течь из областей с повышенным давлением (т. е. от передней и задней частей) в область с пониженным (т. е. к экватору). Около миделевого (поперечного) сечения эти слои сталкиваются (рис. 12, *б*). В результате столкновения происходит отрыв потока с поверхности шара и воздух начинает течь, как показано на рис. 12, *в*, причем давление за шаром уменьшается, что и создает разность давлений спереди и сзади шара и вызывает большое сопротивление, измеряемое коэффициентом $c_x \approx 0,48$.

При больших числах Re пограничный слой у шара переходит в турбулентное состояние и также отрывается от поверхности, но только в точке, лежащей дальше по потоку, чем при ламинарном пограничном слое. Это объясняется тем, что на границе турбулентного пограничного слоя происходит энергичное перемешивание воздуха этого слоя с движущимся над его поверхностью слоем внешним потоком. Благодаря этому слой, текущий спереди назад (по потоку), увлекается внешним потоком, а слой, текущий вперед, тормозится им. В результате первый слой оттесняет точку отрыва назад. При таком смещении точки отрыва картина давления по шару становится более благоприятной и приближается к картине обтекания идеальной жидкостью. При этом коэффициент сопротивления шара падает до весьма малой величины ($c_x = 0,1$) несмотря даже на то, что сопротивление трения о поверхность шара в турбулентном слое будет повышенным.

Законы подобия в аэромеханике

В экспериментах, независимо от того, исследуется ли движение тела относительно покоящегося газа или движение газа относительно неподвижного тела, крайне затруднительно точно воспроизвести обстановку опыта в соответствии с условиями, имеющимися в реальности. Поэтому в экспериментальной аэромеханике широкое распространение получили опыты на моделях. На основании испытаний моделей в условиях ограниченного потока (например в аэродинамических трубах) делают заключения о поведении полноразмерных (натурных) объектов в реальных условиях их движения. Степень достоверности результатов, полученных при испытаниях моделей, зависит от степени соответствия течения около модели или в канале с ограниченными размерами течению около полноразмерного тела или внутри полноразмерного канала, т.е. от соблюдения так называемых условий, или критериев подобия, другими словами — от моделирования явления.

Само моделирование явлений есть замена изучения интересующего нас явления в натуре изучением удобно осуществимого аналогичного явления на модели другого масштаба. Моделирование основано на рассмотрении физически подобных явлений. Подобными называются такие явления (или потоки), у которых все

характеризующие их однородные физические величины находятся для любых сходственных точек^{**} пространства в одинаковом отношении. При этом отношения между массами, скоростями, вязкостью и другими величинами в первом и втором потоках (или движениях) могут быть получены из рассмотрения условий и зависимостей, которые должны одновременно существовать для обоих случаев.

Если по заданным характеристикам одного явления можно пересчетом получить характеристики другого, то такие явления будут механически или физически подобны. Однако для такого перехода, т. е. сохранения подобия при моделировании явлений, необходимо обеспечить выполнение ряда условий. Совершенно обязательным в аэромеханических опытах является осуществление геометрического подобия. Два тела называются геометрически подобными, если все линейные размеры одного из них в одинаковое число раз меньше (или больше) соответствующих размеров другого, а углы сохранены равными. Если известен коэффициент геометрического подобия (масштаб модели), то простым умножением на него размеров модели можно определить размеры геометрически подобно-го натурального объекта.

Рассмотрение на основе уравнений движения достаточных условий механического подобия двух течений вязкой несжимаемой жидкости около двух геометрически подобных и одинаково ориентированных тел приводит к необходимости выполнения следующих условий для любых соответствующих точек обоих рассматриваемых течений:

$$\frac{t_2 u_2}{l_2} = \frac{t_1 u_1}{l_1}; \quad \frac{Z_2 l_2}{u_2^2} = \frac{Z_1 l_1}{u_1^2};$$
$$\frac{v_2}{u_2 l_2} = \frac{v_1}{u_1 l_1}; \quad \frac{p_2}{\rho_2 u_2^2} = \frac{p_1}{\rho_1 u_1^2},$$

где t — характерное время; l — характерный размер; ρ — массовая плотность; v — кинематический коэффициент вязкости; Z — удельная сила на единицу массы; u — скорость; p — давление (ин-

^{**} Под сходственными точками обоих потоков понимаются точки, геометрически подобно расположенные относительно геометрически подобных тел, находящихся в обоих потоках.

дексом 1 обозначены величины, относящиеся к первому течению, индексом 2 — ко второму).

Первое из этих отношений является условием кинематического подобия, остальные характеризуют условия динамического подобия или подобия возникающих при движении сил.

Для сохранения подобия при изучении неустановившихся или периодических движений жидкости или тела (обтекание вращающегося винта, колебания скорости в следе за телом и т.п.) в модельном потоке необходимо сохранить те же отношения tu/l , что и для натурного потока. На практике для периодических явлений пользуются критерием подобия Струхала:

$$Sh = nt/u,$$

где n — частота; u — скорость набегающего потока.

При изучении установившегося течения вязкой несжимаемой жидкости необходимо выполнить два условия подобия (в предположении, что внешней массовой силой является сила тяжести, т.е. $Z = g$):

$$\frac{u_2^2}{gl_2} = \frac{u_1^2}{gl_1} = Fr — \text{число Фруда},$$

$$\frac{u_2 l_2}{\nu_2} = \frac{u_1 l_1}{\nu_1} = Re — \text{число Рейнольдса}^{***}.$$

Таким образом, для вязкой несжимаемой жидкости, находящейся под действием сил тяжести, подобными являются два течения, обладающие одинаковыми числами Рейнольдса и Фруда. Разумеется, при рассмотрении подобных явлений речь идет о течениях около или внутри геометрически подобных тел, одинаково ориентированных относительно потока. Оба условия подобия (равенство чисел Re и Fr) должны применяться при испытаниях моделей кораблей, сопротивление которых складывается из сопротивления трения и сопротивления, связанного с волнами, образующимися на свободной поверхности под действием сил тяжести.

На практике возникает затруднение в одновременном осуществлении одинаковых чисел Re и Fr для модели и натуре. Допустим,

*** Равенство чисел Рейнольдса характеризует равенство отношения сил давления на сходственные площадки отношению сил вязкости на эти же площадки.

что модель в 100 раз меньше натурy, тогда для неизменности числа Fr необходимо у модели взять скорость в 10 раз меньше. Условия сохранения равенства чисел Re требуют (при уже уменьшенных в 100 раз значениях l и в 10 раз — значений v), чтобы коэффициент кинематической вязкости ν для модели был в 1000 раз меньше коэффициента ν для воды (натурy), что осуществить невозможно. Поэтому при испытаниях моделей кораблей, обычно проводимых в воде, сопротивление трения, зависящее от числа Re , определяют независимыми опытами или расчетно-теоретическими способами, а остаточное сопротивление (волновое) определяют, соблюдая подобие только по числам Fr , т.е. так же, как и для идеальной несжимаемой жидкости, находящейся под действием сил тяжести. В случае отсутствия массовых сил условие подобия для вязкой несжимаемой жидкости упрощается и моделирование обеспечивается равенством чисел Рейнольдса, от которых (для заданного положения тела) и будут зависеть аэродинамические силы, действующие со стороны потока.

Вывод условий подобия возможен и другим способом — из теории размерности. Силы, действующие на тела, обтекаемые жидкостью, должны зависеть от свойств жидкости, определяемых ее плотностью, вязкостью и поверхностным натяжением, от скорости движения, ускорения силы тяжести, размеров и формы тела и т.п.

Из экспериментов известно, что общее выражение для сопротивления тела в жидкости при установившемся движении

$$R = \rho l^2 u^2 \varphi(\rho, l, u, \mu, \alpha, g, a),$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения.

Размерность функции φ должна быть нулевой, так как размерность левой части (R) и размерность выражения $\rho l^2 u^2$ есть размерность силы. Таким образом, выражение имеет вид

$$R = \rho l^2 u^2 \varphi^2 \left(\frac{\rho l u}{\mu}; \frac{\rho l u^2}{\alpha}; \frac{u^2}{g l}; \frac{u}{a} \right).$$

Следовательно, два течения жидкости внутри или около геометрически подобных тел можно считать подобными, если безразмерные величины имеют одинаковые значения для обоих течений. Величина $\rho l u / \mu = l u / \nu$ — число Рейнольдса; величина $u^2 / (g l)$ — число

Фруда и u/a — число Маха (число M характеризует условие подобия сил давления и сил инерции в сжимаемой среде). Число $\rho l u/a$ характеризует собой зависимость сопротивления от поверхностного натяжения.

При неустановившемся движении для соблюдения подобия должен быть еще один критерий, который зависит, очевидно, от скорости, характерной длины тела и времени, определяющего продолжительность протекания явления, или периода t , или частоты n . Для того чтобы этот параметр был безразмерной величиной, комбинация указанных величин должна иметь только одну форму, а именно: ut/l или nt/u , которые и есть полученный ранее критерий подобия Струхала.

Удобство получения критериев подобия на основании размерностей состоит в том, что здесь не нужны уравнения движения — достаточно лишь знать величины, от которых зависит движение, или силы взаимодействия тела и жидкости.

Газ или жидкость, обтекающие тело, получают от него воздействие R . По закону Ньютона действие равно противодействию с такой же силой, но направленной в обратную сторону, и жидкость так же будет действовать на тело. Воздействие потока на тело называется *полной аэродинамической (или гидродинамической) силой*. Так как силы, действующие внутри жидкости (действие тела на жидкость), находятся в постоянном отношении c_R , то силы действия жидкости на тело будут находиться в этом же отношении. В дальнейшем изложении под силами R и R_1 приняты силы, действующие на натуру и модель или на их сходственные части. Для практического применения в аэромеханике служат соотношения

$$C_R = \frac{\bar{R}_1}{R} = \frac{\rho_1 l_1^2 u_1^2}{\rho l u^2},$$

откуда

$$\frac{\bar{R}}{\rho_1 l_1^2 u_1^2} = \frac{R}{\rho l^2 u^2} = \text{const} = N\omega.$$

Безразмерные отношения $\bar{R}/(\rho_1 l_1^2 u_1^2)$ для модели и $R/(\rho l^2 u^2)$ для натурy в случае подобия потоков равны друг другу. Величина этого соотношения называется *числом*, или *коэффициентом Ньютона*. Зная величину коэффициента $N\omega$, можно вычислить силы, действу-

ющие на тело при любых значениях ρ , l и u , но лишь при обязательном соблюдении подобия явлений.

В аэромеханике принято пользоваться этими формулами в несколько измененном виде: вместо l^2 вводят площадь крыльев F или площадь поперечного (миделевого) сечения тела, а вместо ρu^2 пишут $\rho u^2/2 = q$. Коэффициент N_w принято обозначать через C (или C_R) и называть коэффициентом полной аэродинамической (или гидродинамической) силы. Тогда выражение для полной силы

$$\bar{R} = C_R \rho F \frac{u^2}{2} —$$

это и есть основная формула экспериментальной аэромеханики для нахождения сил при равномерном движении ($u = \text{const}$).

Оси координат. Аэродинамические коэффициенты

При экспериментальных аэромеханических исследованиях, как и при аэродинамических расчетах летательных аппаратов, обычно пользуются одной из следующих систем координат: скоростной, связанной или полусвязанной. Все эти системы являются «правыми», т.е. такими, в которых для наблюдателя, смотрящего из начала координат вдоль положительного направления какой-нибудь оси, положительным направлением вращения ее является вращение по часовой стрелке. Оси координатных систем именуются в соответствии с правилом цикличности. Начало всех указанных систем координат общее и совпадает с принятым положением центра тяжести аппарата.

В скоростной системе координат $Oxyz$ ось Ox направлена вперед по скорости полета; Oy лежит в плоскости симметрии аппарата (например самолета) и направлена в сторону подъемной силы (верхней поверхности крыла); Oz перпендикулярна плоскости Oxy и направлена в правую сторону (в сторону правого крыла).

В связанной системе координат Ox_1y_1 , соответствующей геометрическим осям аппарата (самолета), ось Ox_1 направлена вперед параллельно строительной горизонтали (или хорде крыла), относительно которой определяется угол атаки α . Полусвязанная система координат при отсутствии скольжения или сноса ($\beta = 0$) полно-

стью совпадает со скоростной. При изменении угла скольжения она вращается вместе с телом вокруг оси Oy .

Отличие полусвязанной системы координат от связанной состоит в том, что связанная система по отношению к полусвязанной оказывается повернутой вокруг оси Oz на угол атаки α , с изменением которого изменяется и положение тела относительно полусвязанной системы координат.

В аэродинамических трубах при испытании неподвижно установленных моделей скорость потока направлена прямо противоположно скорости полета в натуре. Чтобы не приписывать силам лобового сопротивления отрицательного знака, пользуются поточной системой координат, в которой вместо оси Ox , принятой в скоростной системе, применена прямо противоположно направленная ось OQ . Направления положительных вращений в поточной системе координат остаются такими же, как и в скоростной.

Полная аэродинамическая сила, действующая на обтекаемое потоком жидкости или газа твердое тело, пропорциональна плотности, квадрату скорости и квадрату линейных размеров:

$$R = C_R \rho u^2 l^2.$$

Проекции полной аэродинамической силы на скоростные координатные оси называются:

подъемная сила (c_y — коэффициент подъемной силы)

$$Y = c_y \rho \frac{u^2}{2} F;$$

сила по скорости полета (c_x — коэффициент силы по скорости)

$$X = c_x \rho \frac{u^2}{2} F;$$

боковая сила (c_z — коэффициент боковой силы)

$$Z = c_z \rho \frac{u^2}{2} F.$$

Составляющие момента полной аэродинамической силы относительно любых осей координат носят следующие названия:

момент крена (m_x — коэффициент момента крена)

$$M_x = m_x \rho \frac{u^2}{2} FL;$$

момент рыскания (m_y — коэффициент момента рыскания)

$$M_Y = m_Y \rho \frac{u^2}{2} FL;$$

момент тангажа (m_z — коэффициент момента тангажа)

$$M_Z = m_Z \rho \frac{u^2}{2} Fb.$$

Коэффициент полной аэродинамической силы

$$C_R = \sqrt{-c_x^2 + c_y^2 + c_z^2},$$

а коэффициент аэродинамического момента

$$m_M = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + \left(\frac{b}{L} m_z\right)^2}.$$

В поточной системе координат пользуются понятием силы лобового сопротивления $Q = -X$, направленной по скорости потока, и соответственно коэффициентом лобового сопротивления c_x . Положительные направления сил Y и Z совпадают с положительными направлениями осей Oy и Oz .

Установки для экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования воздействия воздуха на движущиеся в нем тела можно проводить двумя методами:

- сообщением телу некоторой скорости относительно неподвижного воздуха и нахождением возникающих при этом аэродинамических сил, приложенных к телу (прямая задача);
- сообщением воздуху некоторой скорости и нахождением возникающих при этом аэродинамических сил, приложенных к неподвижно укрепленному в потоке телу (обратная задача).

Аэродинамическая труба (рис. 13) представляет собой физический прибор, позволяющий получать в одном из его элементов, а именно в рабочей части, где располагается исследуемое тело, искусственный равномерный прямолинейный установившийся поток воздуха определенной скорости. Воздух из неподвижного пространства засасывается вентилятором, установленным в конце

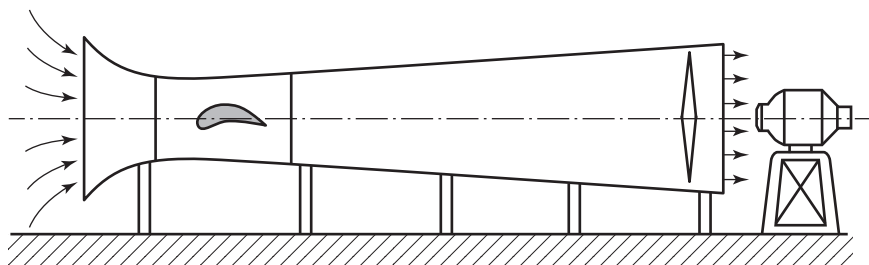


Рис. 13. Схема аэродинамической прямоточной трубы

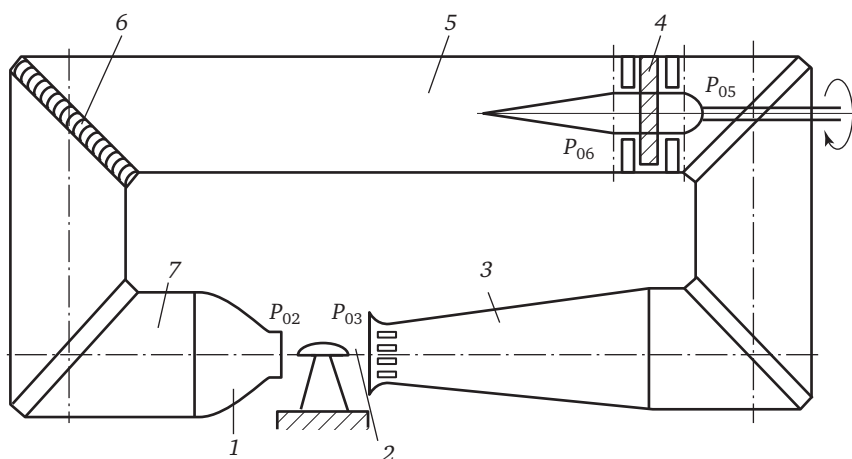


Рис. 14. Схема аэродинамической трубы непрерывного действия:

1 — сопло; 2 — открытая рабочая часть, в которой размещается исследуемый объект (может быть и закрытой); 3 — диффузор; 4 — вентилятор; 5 — обратный канал; 6 — поворотное колено; 7 — форкамера

трубы. Вначале воздух поступает в сопло или коллектор, проходное сечение которого в направлении потока уменьшается, вследствие чего скорость потока увеличивается. Достигнув наибольшей скорости в самом узком сечении коллектора, воздух попадает в диффузор, постепенное расширение сечения которого позволяет плавно снизить скорость, прежде чем он, пройдя вентилятор, попадает в рабочую часть, поперечное сечение которой постоянно. Здесь устанавливается испытываемое тело, которое обтекается равномерным потоком воздуха постоянной скорости. За рабочей частью

находится диффузор, постепенное расширение которого позволяет плавно снизить скорость воздуха, прежде чем он, пройдя вентилятор, покинет трубу.

Рассмотренный вариант аэродинамической трубы называется прямоточным. Другой тип аэродинамической трубы имеет замкнутый контур. Он называется трубой непрерывного действия (рис. 14). В замкнутый контур включен компрессор осевого типа, обеспечивающий заданную степень сжатия на всех режимах работы трубы.

Измерение аэродинамических сил весовым способом

Определение сил и моментов, действующих на тела в потоке газа или жидкости, является одной из наиболее распространенных задач в экспериментальной аэродинамике. В большинстве случаев нахождение этих сил и моментов проводится не непосредственно, а расчетами на основе теории подобия с помощью коэффициентов сил и моментов, определяемых в результате испытаний моделей тел в аэродинамических трубах или на различного рода установках. Силы и моменты, действующие на модели тел, должны быть определены непосредственными измерениями. Такие измерения могут быть проведены либо прямым способом на аэродинамических весах, либо частично косвенным — по измерениям распределения сил давления на модели.

Метод измерения сил и моментов с помощью аэродинамических весов является наиболее точным и надежным, поэтому получил самое широкое распространение в экспериментальной практике. Аэродинамические весы представляют собой прибор, позволяющий в общем случае определить при различных положениях тела составляющие действующей на тело полной аэродинамической силы по трем взаимноперпендикулярным осям координат и момента этой силы относительно этих же осей. Такие весы называются шестикомпонентными аэродинамическими весами.

Аэродинамические коэффициенты апертурных антенн

Параболические отражатели со сплошной поверхностью

При расчете ветровой нагрузки существенное значение имеют аэродинамические свойства конструкции (форма, ориентация и т.д.). Параболические антенны относятся к плохо обтекаемым телам, аэродинамические свойства которых остаются практически постоянными при скоростях ветра до 60 м/с независимо от их размера.

Аэродинамическую нагрузку в общем случае можно привести к результирующей силе и моменту, меняющимся по величине и направлению в зависимости от ориентации рефлектора по отношению к направлению ветрового потока.

Широко распространены антенны в виде симметричной вырезки из параболоида вращения со сплошной или решетчатой поверхностью. Для таких антенн наибольшие значения аэродинамической силы и момента возникают в том случае, когда фокальная ось и вектор ветрового потока образуют либо вертикальную, либо горизонтальную плоскость. В одном случае фокальная ось перемещается в вертикальной плоскости (поворот антенны по углу места), в другом — в горизонтальной (вращение антенны по азимуту). Указанное обстоятельство позволяет свести задачу расчета ветровой нагрузки к плоской, когда результирующая сила в ортогональной системе координат имеет две составляющие (проекции на оси), а момент — одну.

Рассмотрим определение аэродинамической нагрузки на параболические отражатели со сплошной поверхностью.

В связанной системе координат (рис. 1) уравнение отражающей поверхности имеет вид

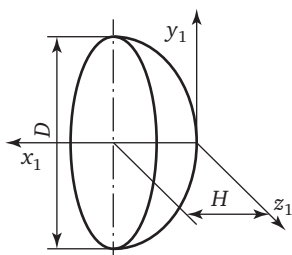


Рис. 1. Параметры антенны в связанной системе координат

$$x_1 = \frac{y_1^2 + z_1^2}{4f}, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние.

Основные конструктивные параметры антенны: D — диаметр; H — глубина. Введем эти параметры в выражение (1), исключив из него параметр f . Учитывая, что $y_1^2 + z_1^2 = (D/2)^2$, при $x_1 = H$, получим

$$\frac{1}{4f} = \frac{4\alpha_H}{D},$$

где

$$\alpha_H = \frac{H}{D} \quad \text{или} \quad x_1 = 4\alpha_H \frac{y_1^2 + z_1^2}{D}. \quad (2)$$

Определение аэродинамической нагрузки проводится в поточной системе координат с началом в точке 0 пересечения оси вращения антенны с ее фокальной осью (рис. 2). При этом ось OX направлена по потоку (по направлению скорости ветра u), ось OY — вверх, а ось OZ — вправо.

В выбранной системе координат, полагая, что антенна вращается относительно направления ветрового потока в горизонтальной плоскости, т.е. относительно оси y , аэродинамическую силу можно передать в виде

$$P_x = P_{x_1} + P_{x_2}; \quad P_z = P_{z_1} + P_{z_2}, \quad (3)$$

где P_{x_1} , P_{z_1} и P_{x_2} , P_{z_2} — аэродинамическая нагрузка на внутреннюю F_1 и внешнюю F_2 поверхности отражателя соответственно. Здесь и далее $u = \text{const}$, т.е. отсутствует пульсация скоростного потока и ветровая нагрузка имеет статический характер.

В общем случае

$$P_{ik} = \int_{F_1} C_{ik} q_p dF_{ik},$$

где q_p — расчетный скоростной напор; F_{ik} — площадь элементарной площадки поверхности рефлектора; C_{ik} — аэродинамический коэффициент элементарной площадки F_{ik} .

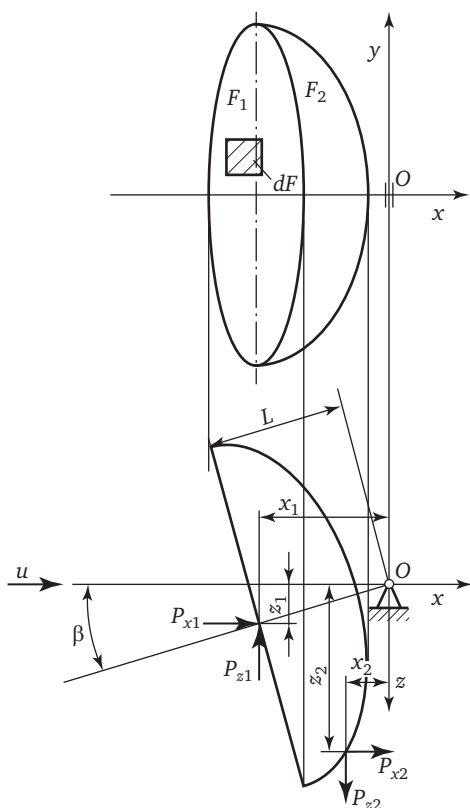


Рис. 2. Схема определения аэродинамической нагрузки

$$P_x = C_x q_p F; \quad P_z = C_z q_p F, \quad (4)$$

где $F = \pi D^2/4$ — характерная площадь рефлектора; C_x — аэродинамический коэффициент лобовой силы (по потоку),

$$C_x = C_{x1} + C_{x2} = \frac{\int C_{xk} F_{1k}}{F} + \frac{\int C_{xk} F_{2k}}{F}; \quad (5)$$

C_z — аэродинамический коэффициент боковой силы

$$C_z = C_{z1} + C_{z2} = \frac{\int C_{zk} F_{1k}}{F} + \frac{\int C_{zk} F_{2k}}{F}. \quad (6)$$

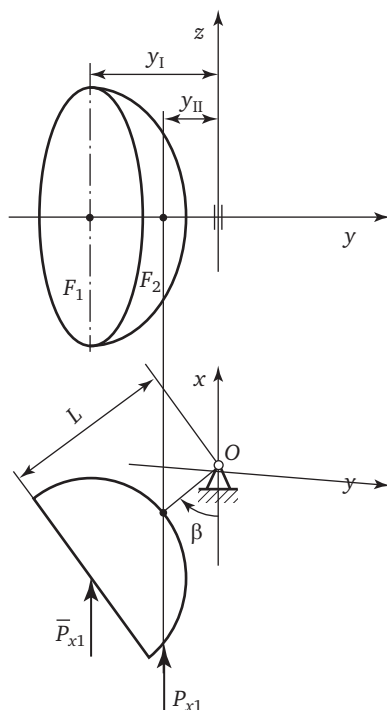


Рис. 3. Схема определения угла атаки

При вращении антенны аэродинамические коэффициенты изменяются. Иными словами, C_x и C_z являются функцией угла атаки β (рис. 3), т.е. угла, образованного вектором ветрового потока и фокальной осью антенны. При этом критическим является угол атаки, $\beta = \beta_0$, где β_0 — угол наклона касательной у поверхности отражателя в крайней его точке, лежащей в плоскости xOz :

$$\beta_0 = \arctg \left(\frac{dz_1}{dx_1} \right)_{x_1 = \frac{D}{2}} = \arctg \left(\frac{1}{4\alpha_H} \right).$$

При $\beta \leq \beta_0$ ветровой поток создает давление только на внутреннюю, наветренную поверхность F_1 . Наружная поверхность F_2 при этом является тыльной и на ней формируется зона разрежения. В этом случае $C_{x2} = C_{z2} = 0$. При $90^\circ > \beta > \beta_0$ ветровой поток создает давление как на внутреннюю, так и на наружную поверхности. При

$\beta > 90^\circ$ наружная поверхность превращается в наветренную, а внутренняя — в тыльную.

Значения коэффициентов C_x и C_z можно рассчитать соответственно по зависимостям (5) и (6), если элементарную площадку рассматривать как плоскую пластинку (см. рис. 2), наклоненную к ветровому потоку под углом β' , определяемым как угол между нормалью к площадке и вектором ветрового потока.

Функции $C_{Ri} = f(\beta')$, $C_{xi} = f(\beta')$ и $C_{zi} = f(\beta')$ для плоской пластины, установленной поперек потока, представлены в виде графиков, показанных на рис. 4. Здесь C_{Ri} — полный аэродинамический коэффициент.

Распределение давления по пластинке от угла атаки приведено на рис. 5.

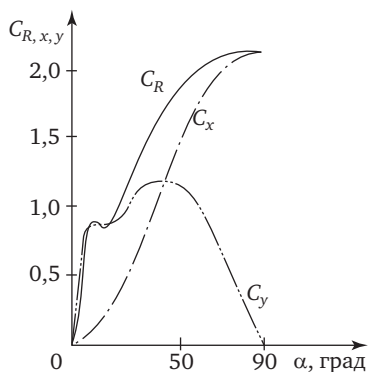


Рис. 4. График зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки

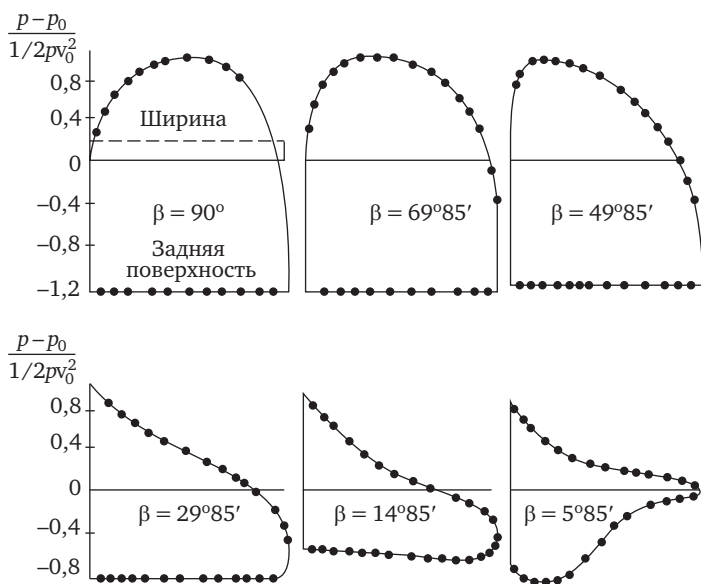


Рис. 5. Распределение давления по пластинке в зависимости от угла атаки

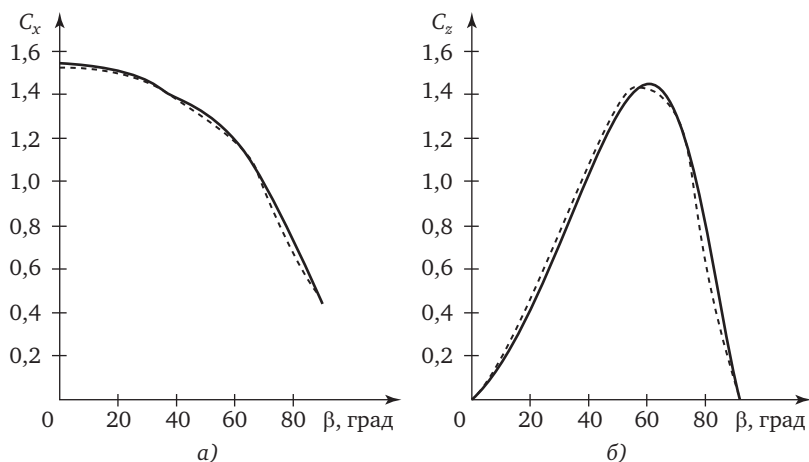


Рис. 6. Графики аэродинамических коэффициентов C_x (а) и C_z (б) по углу атаки

Решение задачи оценки распределения давления производится численным методом, однако оно не может быть точным из-за невозможности учета граничных, краевых и других условий обтекания тела турбулентным потоком. Поэтому проведенные расчеты, в которых значение коэффициента α_H варьировалось в диапазоне $0 \dots 0,5$, а угол β изменялся в пределах $0 \dots 180^\circ$, сравнивались с экспериментальными данными и корректировались по результатам продувки реальных конструкций антенн в аэродинамической трубе.

На рис. 6 приведены графики аэродинамических коэффициентов C_x и C_z , определенные по полученным зависимостям (сплошная линия), и графики, полученные экспериментально (пунктирная линия), для зеркала диаметром 1,5 м и относительной глубиной $\alpha_H/3$. При этом максимальная погрешность составила 7%.

Полученные в графическом и табулированном виде зависимости достаточно хорошо аппроксимируются следующими соотношениями:

- при $\beta \leq \beta_0$:

$$C_{x_1} = (1,1 + 1,35\alpha_H)(1 + 0,38\sin^2 \beta)\cos \beta; \quad C_{x_2} = 0; \quad (7)$$

$$C_{z_1} = (0,6 + \sin^2 \beta)\sin 2\beta; \quad C_{z_2} = 0; \quad (7, a)$$

- при $\beta_0 < \beta \leq 90^\circ$:

C_{x_1} определяются по формуле (7);

$$C_{x_2} = \frac{\beta - \beta_0}{90^\circ - \beta_0}; \quad (8)$$

C_{z_1} определяется по формуле (7,а);

$$C_{z_2} = \sin 360^\circ \left(\frac{\beta - \beta_0}{180^\circ - \beta_0} \right); \quad (8, a)$$

- при $90^\circ < \beta \leq 180^\circ$:

$$C_{x_1} = (1,1 - 0,45\alpha_H)(1 + 0,38\sin^2 \beta) \cos \beta; \quad (9)$$

$$C_{x_2} = \frac{(180^\circ - \beta_0) - \beta}{90^\circ - \beta_0}; \quad (9, a)$$

$$C_{z_1} = (1 - 2\alpha_H)(0,6 + \sin^2 \beta) \sin 2\beta; \quad (9, б)$$

$$C_{z_2} = 0,5 \sin 360^\circ \left(\frac{\beta - \beta_0}{90^\circ - \beta_0} \right). \quad (9, в)$$

Для практических целей наиболее важным является максимальное значение аэродинамической силы, которое определяется из соотношения

$$C_R = \sqrt{C_x^2 + C_z^2}. \quad (10)$$

Угол действия результирующей силы может быть определен из соотношения

$$\beta = \arctg \frac{C_x}{C_z}. \quad (10, a)$$

Как правило, эта величина имеет место при $\beta = 0$, когда $C_z = 0$ и, следовательно, $C_R = C_x$.

Из формулы (7) следует, что максимальная сила соответствует значению аэродинамического коэффициента

$$C_x = (1,1 + 1,35\alpha_H). \quad (11)$$

На рис. 7—9 приведены графики зависимостей коэффициентов C_x , C_z и C_R соответственно.

Как видно из приведенных формул и графиков, ветровая нагрузка во многом определяется геометрией рефлектора. Так, при $\alpha_H = 0$ (плоская круглая пластина) $C_x = 1,1$ (минимальное значение аэродинамического коэффициента), при $\alpha_H = 0,2$ этот коэффициент равен 1,37. Если антенна обращена к ветровому потоку тыльной стороной ($\beta > 90^\circ$), условия обтекания более благоприятны. В частности, если при $\alpha_H = 0,2$ $\beta = 180^\circ$, значение аэродинамического коэффициента существенно меньше. Согласно (9) в этом случае $C_x \approx 1,0$.

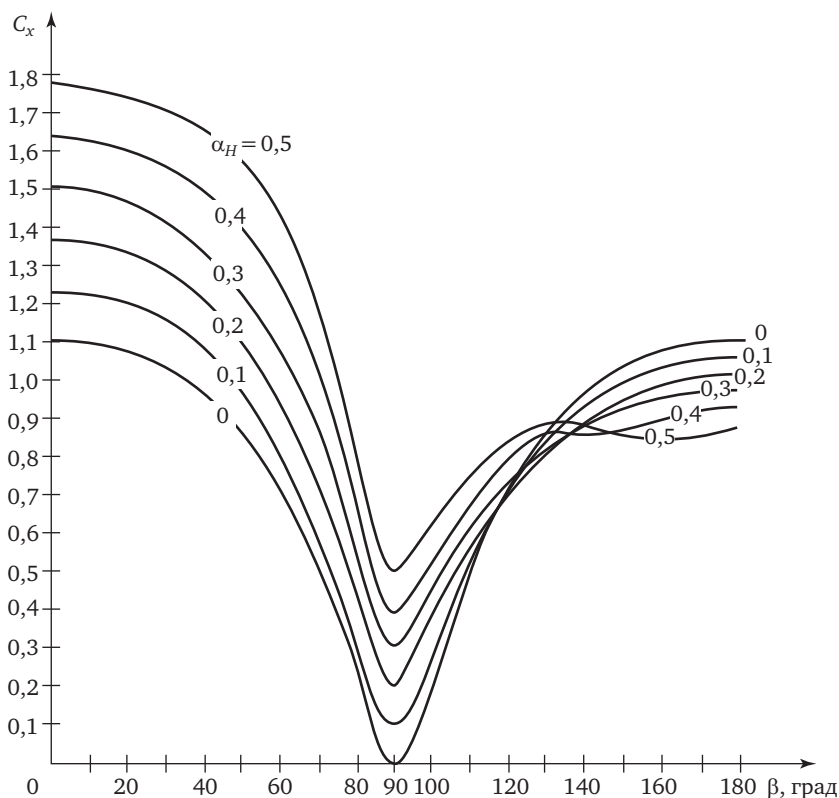


Рис. 7. Графики зависимости аэродинамических коэффициентов C_x для различных соотношений H/D

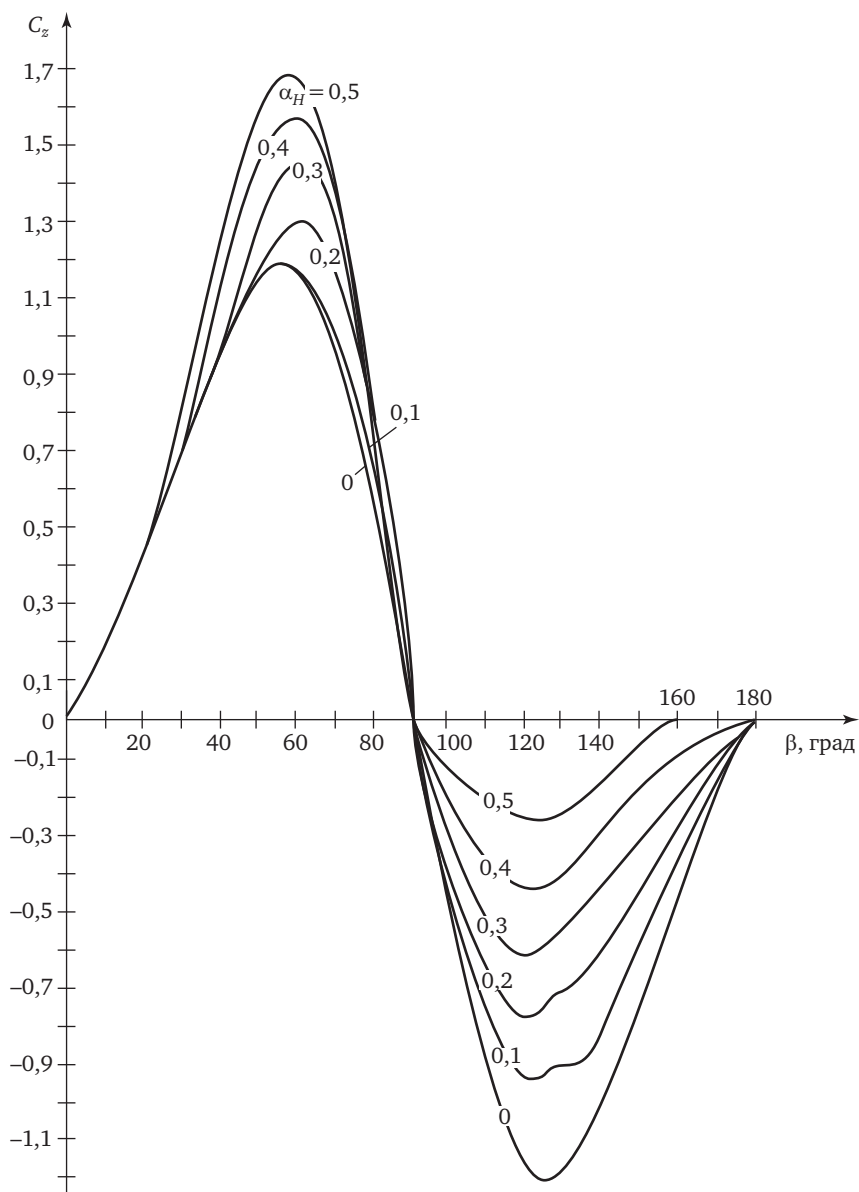


Рис. 8. Графики зависимости аэродинамических коэффициентов C_z для различных соотношений H/D

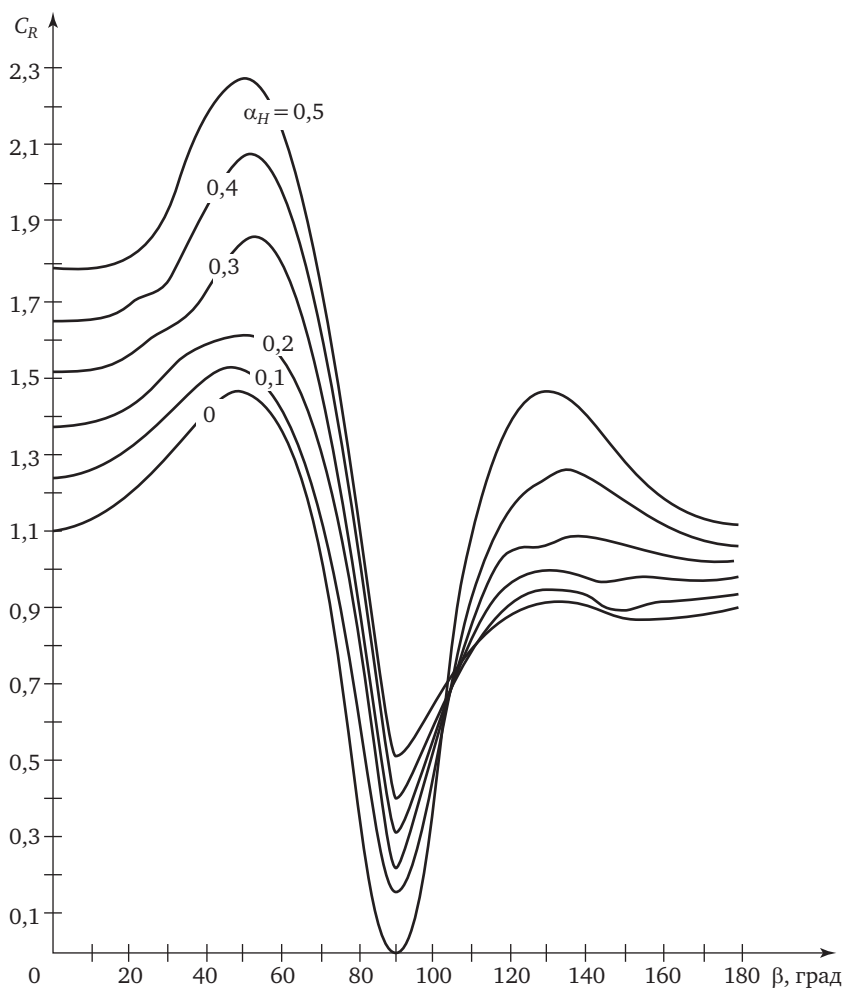


Рис. 9. Графики зависимости аэродинамических коэффициентов C_R для различных соотношений H/D

Рассмотренный пример свидетельствует о том, что для уменьшения ветровой нагрузки при определенных условиях целесообразно использовать обтекатели. Однако их применение обусловлено рядом отрицательных факторов (потери СВЧ-энергии, ухудшение параметров антенны, высокая стоимость), поэтому в наземных антеннах диаметром более 2,5 м обтекатели не применяют.

Для расчета опоры и механизмов вращения на прочность и жесткость кроме результирующей силы важное значение имеет момент, создаваемый этой силой относительно соответствующей оси. В рассматриваемом случае момент относительно оси y может быть определен из следующей формулы:

$$M_y = m_y q_p F D, \quad (12)$$

где m_y — аэродинамический коэффициент момента относительно оси y ,

$$m_y = \bar{L} m_{y_1} + m_{y_2}; \quad (13)$$

L — расстояние от оси вращения до плоскости раскрыва отражателя (см. рис. 2); $\bar{L} = L/D$ — условное относительно плечо.

Из полученных ранее зависимостей следует:

$$m_{y_1} = C_x \sin \beta + C_z \cos \beta; \quad (14)$$

$$m_{y_2} = -(C_{x_2} \lambda_2 + C_{x_2} \lambda_x), \quad (14, a)$$

где

$$\lambda_x = 0,5 \left(1 - 0,22 \frac{\beta - \beta_0}{90^\circ - \beta_0} \right) \sin \beta; \quad (15)$$

$$\lambda_z = 0,4 \left[\frac{1}{4\alpha_H \operatorname{tg} \beta} + \alpha_H \sin \beta \left(\frac{\beta - \beta_0}{90^\circ - \beta_0} \right) \right] \cos \beta \left(\frac{180^\circ - 2\beta}{180^\circ - 2\beta_0} \right). \quad (15, a)$$

Графики коэффициентов m_{y_1} и m_{y_2} , построенные по формулам (14) и (14, a), для наиболее характерного диапазона α_H приведены соответственно на рис. 10 и 11.

По формулам (13), (14) (14, a), (15) и (15, a) рассчитывается коэффициент $m_y = f(\beta)$, находится его максимальное значение, которое и является расчетным.

На рис. 12 показаны расчетная и экспериментальная кривые $m_y = f(\beta)$ для $\alpha_H = 1/3$ и $\bar{L} = 0,2$. Как видно из графика, полученные зависимости дают в достаточной степени близкие результаты в области максимальных значений, что дает основание использовать полученные результаты для практических расчетов.

Однако построение графиков является довольно трудоемкой операцией. В связи с этим были проведены расчеты коэффициентов $m_y = f(\beta)$ для ряда значений α_H и $\bar{L}$, приведенные на рис. 13.

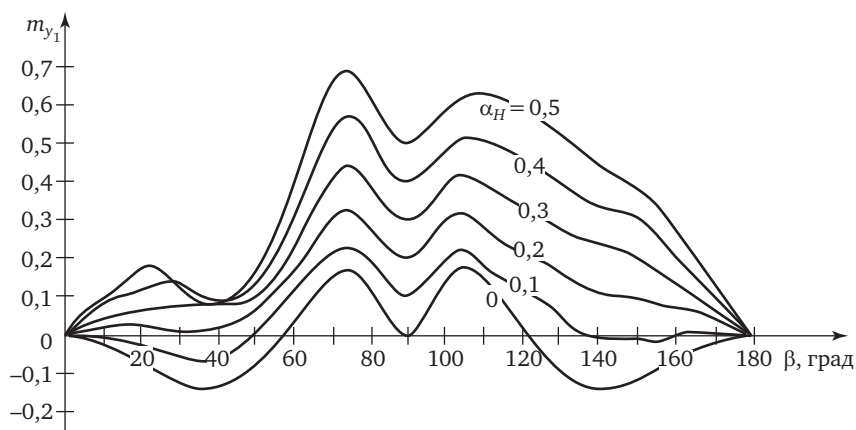


Рис. 10. Графики зависимости аэродинамических коэффициентов относительно оси Y_1

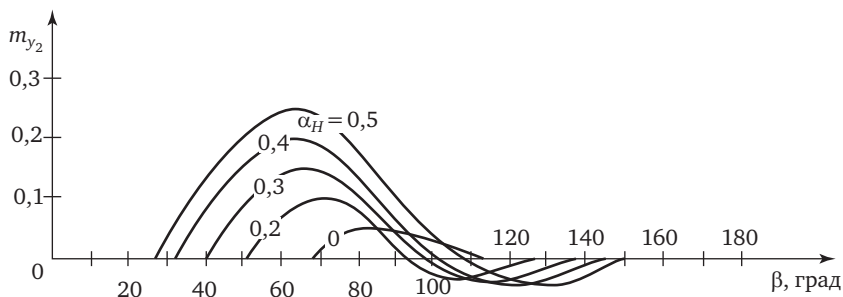


Рис. 11. Графики зависимости аэродинамических коэффициентов относительно оси Y_2

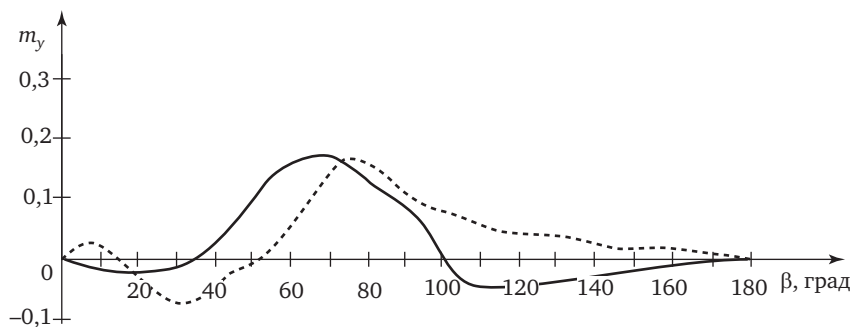


Рис. 12. Экспериментальный и расчетный аэродинамический коэффициент момента

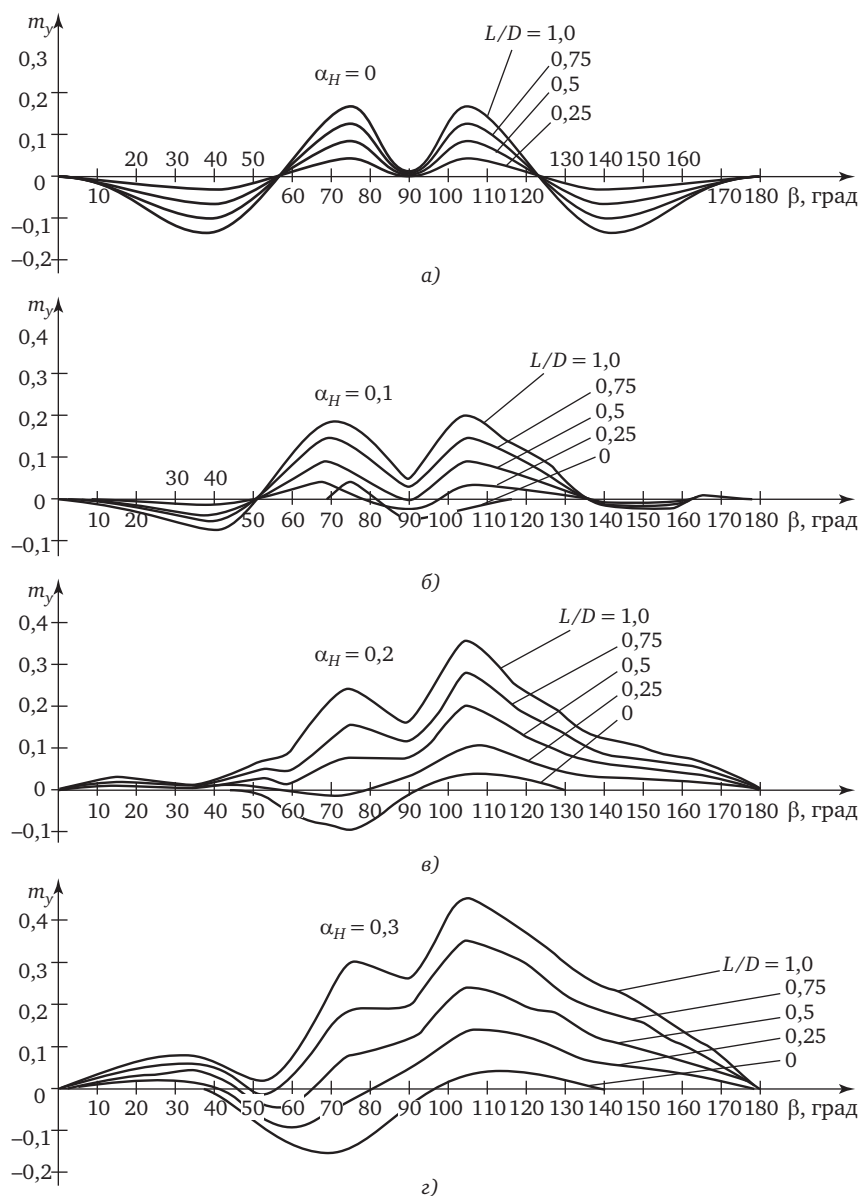


Рис. 13 (начало). Аэродинамические коэффициенты момента при соотношении параметров H/D :

а — 0; б — 0,1; в — 0,2; г — 0,3

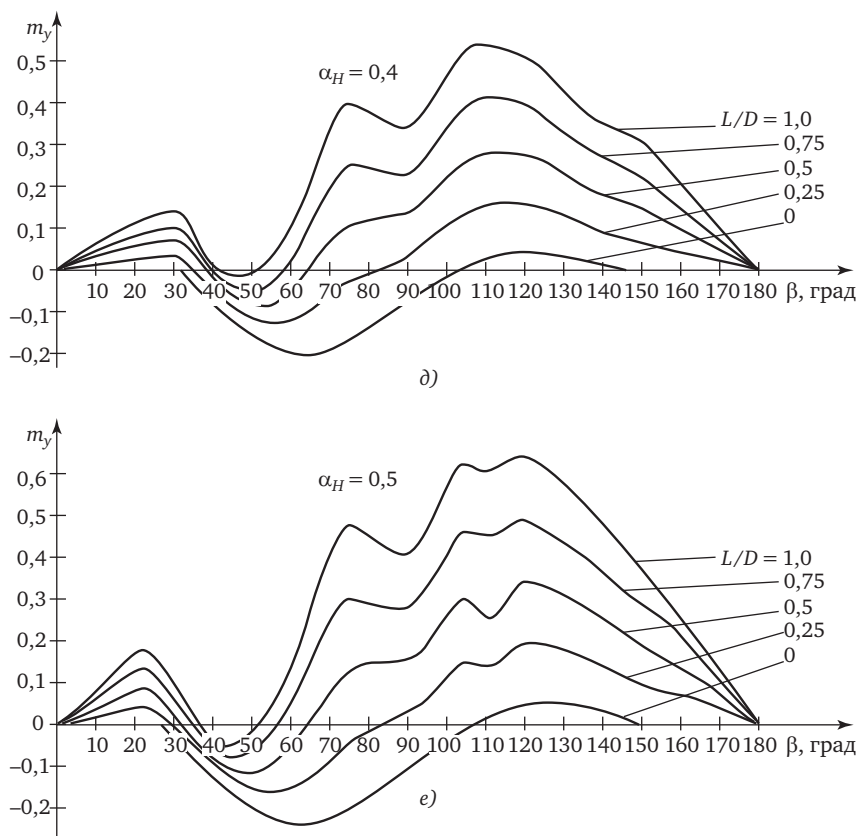


Рис. 13 (окончание). Аэродинамические коэффициенты момента при соотношении параметров H/D :
 $\delta — 0,4$; $e — 0,5$

Использование приведенных графиков облегчает расчеты. По результатам обработки этих графиков построена номограмма, приведенная на рис. 14, по которой может быть определено максимальное значение момента по заданным α_H и $\bar{L}$.

Приведенные формулы служат для расчета нагрузок на опорно-поворотное устройство. Для расчета напряженно-деформированного состояния зеркала необходимы данные о распределении давления по его раскрытию. Для этого могут быть использованы данные, приведенные на рис. 15.

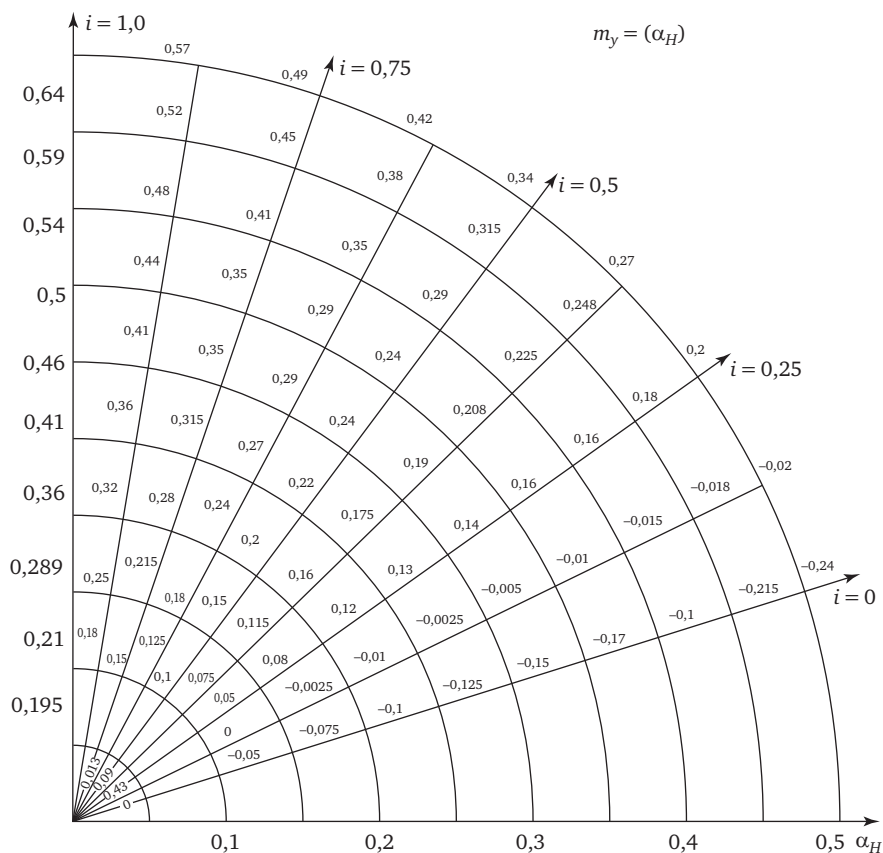


Рис. 14. Номограмма для определения аэродинамического момента

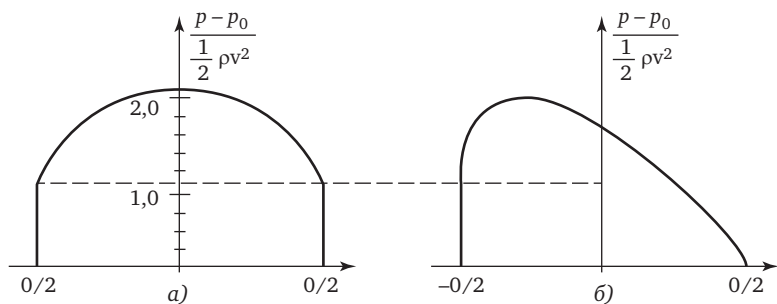


Рис. 15. Распределение давления по диаметральной хорде раскрыва зеркала при различных углах атаки:

 $\alpha - \beta = 0$; $\alpha - \beta \neq 0$

Параболические отражатели с решетчатой поверхностью

Для улучшения аэродинамических качеств антенное полотно выполняют в виде решетки. В антеннах, имеющих отражатель с решетчатой поверхностью, аэродинамическое сопротивление создается не только отражателем, но и расположенным за ним силовым каркасом. Полотно отражателя выполнено в виде параллельно расположенных проводников — стержней, чаще всего круглого сечения (проволока, трубки). Проводники, как правило, располагают с постоянным по раскрытию шагом t (рис. 16). Силовой каркас обычно выполняют из труб или угольников.

Аэродинамический коэффициент антенны C_x складывается из аэродинамического коэффициента полотна $C_x^п$ и аэродинамического коэффициента каркаса $C_x^к$:

$$C_x = C_x^п + C_x^к.$$

Аэродинамический коэффициент каркаса, отнесенный к площади апертуры, как правило, принимают равным 0,19...0,22.

При одностороннем обдуве, когда угол атаки ветрового потока или (что то же самое) угол β между направлением ветрового потока и фокальной осью антенны меньше угла β_0 наклона касательной к поверхности отражателя в крайней ее точке, коэффициент аэродинамического сопротивления полотна

$$C_x^п = C_x^э / \varphi,$$

где $C_x^э$ — коэффициент лобового сопротивления единичного стержня; для стержней круглого сечения диаметром до 30 мм при скоростях ветра до 70 м/с, $C_x^э = 1,2$; $\varphi = F_T / F$ — коэффициент заполнения полотна; F — миделева площадь апертуры полотна.

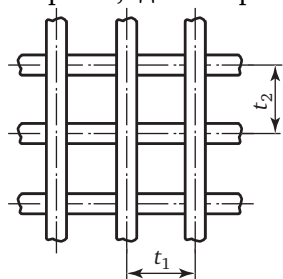


Рис. 16. Расположение проводников силового каркаса

Для плоской решетчатой поверхности при $\beta = 0^\circ$ коэффициент заполнения

$$\varphi = \frac{t_1 d + (t_2 - d)d}{t_1 t_2} \approx \frac{d}{t_1} + \frac{d}{t_2}.$$

Поскольку отражающая поверхность полотна имеет кривизну, шаг в проекции на

плоскость раскрыва неравномерен, поэтому в формулу коэффициента заполнения подставляется значение среднего шага:

$$\varphi = \frac{d_1}{t_{1cp}} + \frac{d_2}{t_{2cp}}.$$

Проекция j -го шага решетки на плоскость, перпендикулярную ветровому потоку при $\beta \leq \beta_0$ (рис. 17),

$$t_j = t \cos \gamma_j - t \cos(\alpha_j + \beta).$$

Тогда средняя величина шага решетки на участке $y_1 \dots y_2$

$$t_{cp} = \frac{t \int_{y_1}^{y_2} \cos(\alpha_j + \beta) dy}{y_2 - y_1}.$$

Решая данное уравнение и учитывая, что для параболического отражателя

$$\alpha_j = \frac{dx_j}{dy_i} = \arctg \frac{8\alpha_H y_i}{D},$$

получаем

$$t_{cp} = \frac{D^2}{16H} \frac{t}{y_2 - y_1} (A \cos \beta - 2B \sin \beta),$$

где

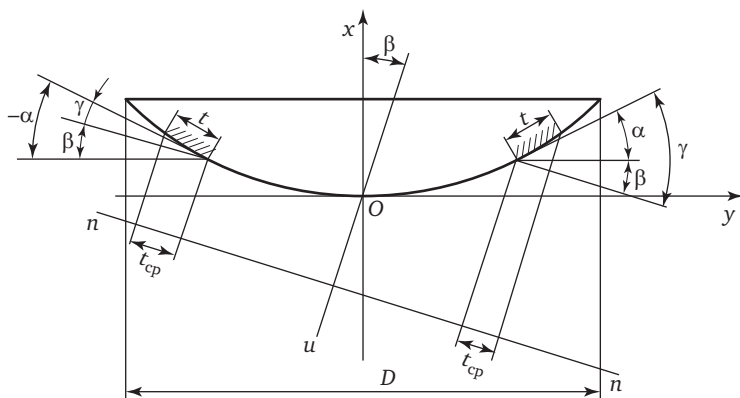


Рис. 17. Схема расчёта коэффициента заполнения

Определив эти точки, получаем:

Для участка KT

$$t_{cp} = 4\alpha_Y \frac{1}{D} (A_1 \cos \beta - 2B_1 \sin \beta),$$

где

$$A_1 = \ln \left[\frac{1 + \sin \arctg 2(\operatorname{tg} \varphi - 2\alpha_H)}{1 - \sin \arctg 2(\operatorname{tg} \varphi - 2\alpha_H)} \right] \left[\frac{1 + \sin \arctg 4\alpha_H}{1 - \sin \arctg 4\alpha_H} \right];$$

$$B_1 = \frac{\cos \arctg 4\alpha_H - \cos \arctg 2(\operatorname{tg} \varphi - 2\alpha_H)}{\cos \arctg 4\alpha_H \cdot \cos \arctg 2(\operatorname{tg} \varphi - 2\alpha_H)};$$

$$\varphi = 90^\circ - \beta.$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления на участке KT

$$C_{x1}^n = 0, 3\alpha_H \frac{d}{t} \frac{1}{A_1 \cos \beta - 2B_1 \sin \beta}.$$

Для участка SQ значение среднего шага

$$t_{cp} = \frac{t}{2(4\alpha_H - \operatorname{ctg} \beta)} \frac{1 + \cos \beta}{1 - \cos \beta} (A_2 \cos \beta - 2B_2 \sin \beta),$$

где

$$A_2 = \ln \left(\frac{1 + \sin \arctg 4\alpha_H}{1 - \sin \arctg 4\alpha_H} \right) \frac{1 + \cos \beta}{1 - \cos \beta};$$

$$B_2 = \frac{1}{\cos \arctg 4\alpha_H} \frac{1}{\cos \arctg 4\alpha_H} - \frac{1}{\sin \beta}.$$

При этом коэффициент аэродинамического сопротивления на участке SQ

$$C_{x2}^n = \frac{2, 4d(4\alpha_H - \operatorname{ctg} \beta)}{t(A_2 \cos \beta - 2B_2 \sin \beta)}.$$

Полный коэффициент аэродинамического сопротивления

$$C_x^n = 0, 3\alpha_H \frac{d}{t} \frac{1 + \eta}{A_1 \cos \beta - 2B_1 \sin \beta} + \frac{2, 4d(4\alpha_H - \operatorname{ctg} \beta)}{t(A_2 \cos \beta - 2B_2 \sin \beta)}.$$

Для расчета на прочность и жесткость опорно-поворотного устройства по приведенным зависимостям определяется ветровая нагрузка на антенну с решетчатым рефлектором. При расчете конструкции рефлектора эта нагрузка представляется в виде распределенной по апертуре, причем закон распределения давления приближенно можно принимать таким же, как и для отражателей со сплошной поверхностью.

После определения аэродинамической нагрузки определяется аэродинамический момент. В решетчатых антеннах будет три составляющих момента. Опуская вычисления плеч для трех аэродинамических сил, запишем результаты вычислений. Аэродинамический момент вычисляется по формуле (12), аэродинамический коэффициент m_y — по формуле (13). При этом составляющие коэффициента имеют следующий вид:

$$m_{y1} = [C_{x1}(1 + \eta) + C_{x2}] \sin \beta;$$

$$m_{y2} = \lambda_y (C_{x1} \eta + C_{x2}),$$

где

$$\lambda_y = 0,4 \left(\frac{1}{4\alpha_H \operatorname{tg} \beta} + \alpha_H \sin \frac{\beta - \beta_0}{\frac{\pi}{2} - \beta_0} \beta \right) \cos \frac{\pi - 2\beta}{\pi - 2\beta_0} \beta;$$

$$C_{x1} = C_{x1}^{\Pi} + C_{x1}^{\text{к}};$$

$$C_{x2} = C_{x2}^{\Pi} + C_{x2}^{\text{к}}.$$

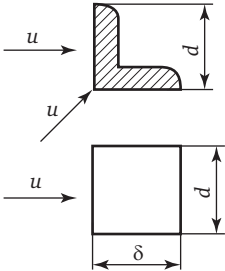
Таким образом, зная размеры полотна (диаметр, глубину, а также диаметр трубки и шаг решетки), для заданного угла атаки можно определить аэродинамическую нагрузку и аэродинамический момент.

Аэродинамические коэффициенты элементов антенных конструкций

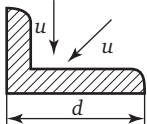
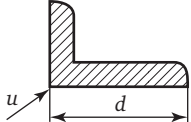
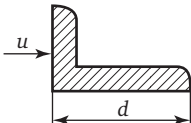
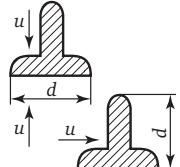
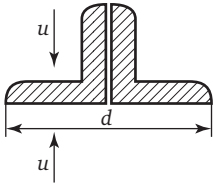
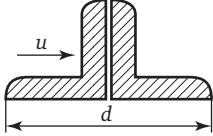
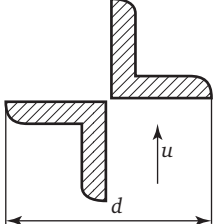
Аэродинамические коэффициенты приведены в табл. 1—3, коэффициенты затенения — в табл. 4.

Основные обозначения: d — расчетный поперечный размер элемента, м; ud — параметр, определяющий значение аэродинамического коэффициента цилиндрического коэффициента цилиндрического элемента $\text{м}^2/\text{с}$; l — длина, м; F — расчетная площадь элемента, м^2 .

1. Аэродинамический коэффициент бесконечно длинных стержней

Профиль	C_x	Примечания
Равнобокий уголок	1,83	C_x — коэффициент аэродинамической силы, совпадающей с направлением ветра. C_x кругового профиля соответствует параметру $ud < 2,2$. За площадь F независимо от направления ветра принимается площадь, определяемая размером профиля: $F = ld$
 $\delta/d = 0 \dots 1,0$	2,00	
Квадрат	2,40	

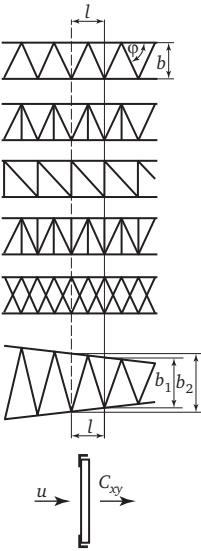
Продолжение табл. 1

Профиль	C_x	Примечания
Неравнобокий уголок		1,90
		2,00
		1,60
Тавр		2,0
Спаренные равнобокие уголки		1,50
		0,70
		1,75

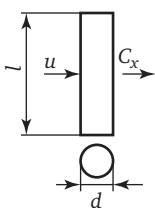
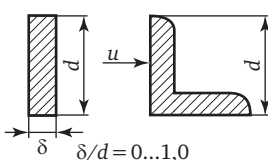
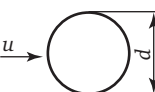
Окончание табл. 1

Профиль	C_x	Примечания
Спаренные равнобокие уголки	1,10	
Круг	1,20	
Швеллер	2,20	
	1,90	
	0,50	
Двутавр	2,05	
	0,07	

2. Аэродинамический коэффициент плоских ферм

Плоские фермы	Коэффициент	Примечания										
Отсеки плоских ферм при направлении ветра, перпендикулярном к плоскости фермы 	$C_{x(p)} = K \frac{\sum_{i=1}^n C_{xi} F_i}{F}$ <table><tr><td>$F_t/F_r, \%$</td><td>0</td><td>10</td><td>20</td><td>30...90</td></tr><tr><td>K</td><td>1,0</td><td>0,92</td><td>0,81</td><td>0,75</td></tr></table> Для отсека, набранного из стержней с равными значениями коэффициента $C_{xi} = C_x$, отнесенного к теневой площади стержня $C_{xi} = C_x$	$F_t/F_r, \%$	0	10	20	30...90	K	1,0	0,92	0,81	0,75	$C_{x(p)}$ — коэффициент аэродинамической силы, перпендикулярной к плоскости фермы; C_{xi} — коэффициент профилей стержней отсека при направлении ветра, перпендикулярном к плоскости фермы; F_i — площадь стержня (фасонки); n — число элементов отсека; F_t — теневая площадь отсека; K — безразмерный коэффициент, учитывающий взаимное аэродинамическое влияние стержней; F_t/F_r — относительное заполнение теневой площадью отсека его габаритной площади, вычисляемой по наружному периметру отсека $F_r = lb$, $F_r = l(b_1 + b_2)/2$
$F_t/F_r, \%$	0	10	20	30...90								
K	1,0	0,92	0,81	0,75								
Плоские фермы из нескольких отсеков при направлении ветра, перпендикулярном к плоскости фермы (в зоне постоянного по высоте скоростного напора)	$C_{x(\phi)} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{x(p)} F_i}{F_\phi}$ Для фермы, набранной из отсеков с равными значениями коэффициента $C_{x(p)} = C_{x1}$	$C_{x(\phi)}$ — коэффициент аэродинамической силы, перпендикулярной к плоскости фермы; $C_{x(p)}$ — коэффициент отсека, определяемый по формулам; F_t — теневая площадь отсека; m — число отсеков фермы; F_ϕ — теневая площадь фермы, равная сумме теневых площадей ее отсеков										

3. Аэродинамический коэффициент элементов конструкций

Элемент	Коэффициент C_x				Примечания
Стержень круглого сечения при направлении ветра, перпендикулярном продольной оси 	ud	C_x	ud	C_x	C_x — коэффициент аэродинамической силы, совпадающий с направлением ветра. Значения C_x табл. 1 соответствуют бесконечно длинному цилиндру. При $ud = 0,75 \dots 2,20$, значения C_x превосходят значения цилиндра с соотношением $l/d \geq 50$ не более чем на 10%, $F = ld$
	$\leq 2,2$	1,20	20	0,44	
	3,0	1,05	30	0,53	
	4,0	0,80	40	0,60	
	5,0	0,65	50	0,65	
	6,0	0,40	60...130	0,70	
	6,5...15	0,35			
$C_x = 1,2$				Независимо от параметра ud	
Отдельные стержни при направлении ветра, перпендикулярном продольной оси стержня	Значения C_x стержней конечной длины				
Пластина, стержень с прямоугольным, квадратным сечением, угловой стержень 	l/d	C_x	l/d	C_x	$F = ld$, l — длина элемента
	1...5	1,20	25...50	1,62	
	5...10	1,24	50...100	1,83	
	10...15	1,29	100...200	1,88	
	15...25	1,41	≥ 200	2,0	
Труба 	l/d	C_x	l/d	C_x	$ud \leq 2,2$. При $ud > 2,2$ значения C_x принимаются по табл. 1 независимо от l/d $F = ld$
	1...5	0,72	25...50	0,97	
	5...10	0,74	50...100	1,10	
	10...15	0,77	100...200	1,13	
	15...25	0,85	≥ 200	1,20	

4. Значение коэффициента затенения η пространственной решетки

l/h	Коэффициент затенения η					
	при φ^*					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6 и более
0,5	0,93	0,75	0,56	0,38	0,19	0
1,0	0,99	0,81	0,65	0,48	0,32	0,15
2,0	1,0	0,87	0,73	0,59	0,44	0,3
4,0	1,0	0,9	0,78	0,65	0,52	0,4
6,0	1,0	0,93	0,83	0,72	0,61	0,5

* $\varphi = F_k/F_p$ — коэффициент заполнения решетки; F_k и F_p — площадь по наружному обводу и миделева площадь элементов решетки; h — ширина решетки; l — расстояние между передней и задней решетками.

Расчет мачты. Алгоритм расчета

Представлена последовательность расчета наиболее распространенных схем построения мачт с числом пролетов до четырех, с тремя или четырьмя оттяжками в плане (отсчет пролетов мачты и ярусов начинается с верхнего).

Принятые обозначения

H	— высота мачты, м
H_i	— высота пролета мачты, м
n	— число пролетов мачты
i	— порядковый номер пролета мачты и яруса (узла) оттяжек
k	— число оттяжек в плане
j	— порядковый номер оттяжки в плане (наветренная оттяжка имеет номер $j = 1$)
L_i	— длина оттяжки в i -м ярусе, м
β_i	— угол наклона оттяжки i -го яруса к горизонту, град.
F_{ci}	— площадь поперечного сечения ствола в i -м пролете, м^2
F	— площадь поперечного сечения каната оттяжки, м^2
J_{ci}	— момент инерции сечения ствола в i -м пролете, м^4
E_c	— модуль упругости материала ствола, МПа
E	— модуль упругости каната оттяжки, МПа
φ_z	— угол между направлением нагрузки (ветра) и наветренной оттяжкой, град.
e	— эксцентриситет закрепления оттяжки, м

Нагрузка на вершину мачты:

P_A	— горизонтальная (ветровая), Н
G_A	— вертикальная (весовая), Н
M_A	— изгибающий момент, Н·м
q_{ci}	— погонная ветровая нагрузка на ствол в i -м пролете, Н/м
q_i	— погонная ветровая нагрузка на оттяжку i -го пролета, Н/м
g_{ci}	— погонная масса ствола i -го пролета, Н/м
g_i	— погонная масса оттяжки i -го яруса, Н/м
T_{0i}	— начальное тяжение оттяжек, Н
Δt	— разность температур, град.

α	— коэффициент линейного расширения оттяжки, град. ⁻¹
P_i	— давление ветра на оттяжки, приведенное к узлу, Н
R_i	— узловая горизонтальная нагрузка, Н
σ_{Ri}	— узловая нагрузка, выраженная через напряжение в оттяжке, МПа
P_{ij}	— приведенная нагрузка на j -ю оттяжку i -го яруса, МПа/м
T_{ij}	— усилие в j -й оттяжке i -го яруса, Н
σ_{0i}	— монтажное напряжение в оттяжке, МПа
σ_{ij}	— напряжение в j -й оттяжке i -го яруса, МПа
A_{ij}	— коэффициент j -й оттяжки i -го яруса, МПа ³
B_i	— коэффициент исходного состояния оттяжки, МПа
N_i	— продольная сила в i -м пролете, Н
x_i	— осадка i -й опоры, м
δ_i	— податливость i -й опоры, м/Н
v_i	— жесткость i -й опоры, Н/м
$\lambda_{i\text{прив}}$	— приведенная гибкость ствола мачты в i -м пролете
λ_{ni}	— гибкость пояса мачты в i -м пролете
m	— число поясов решетки ствола
W_{ci}	— момент сопротивления сечения ствола мачты, м ³
$[\sigma]$	— допускаемое напряжение, МПа
φ_{ci}^y	— коэффициент понижения допускаемого напряжения для сечения ствола
φ_{Ai}^y	— коэффициент понижения допускаемого напряжения для пояса
N_{mi}	— усилие в поясе от изгибающего момента m_{iz} , Н
λ	— коэффициент запаса устойчивости мачты
θ_Σ	— угол отклонения вершины мачты от вертикальной оси, град.
θ_1	— угол отклонения вершины мачты от вертикальной оси под воздействием горизонтальной ветровой нагрузки, град.
θ_2	— угол отклонения вершины мачты от вертикальной оси под воздействием изгибающего момента и вертикальной нагрузки, град.
$\bar{M}_{iz}$	— изгибающий момент в i -м узле, Н·м

Первый этап. Расчет оттяжек

Давление ветра на оттяжки, приведенное к i -му узлу:

$$P_i = \frac{k_i q_i l_i}{4} (1 + \sin \beta_i^2),$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Узловая горизонтальная нагрузка в i -й опоре:

$$R_i = P_i + \frac{q_i H_i}{2} + \frac{q_{i+1} H_{i+1}}{2} + P_A \omega_{Pi} + (-1)^{i-1} \omega_{Mi} \frac{M_A}{L_1},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $\omega_{P1} = 1$ при $i = 1$; $\omega_{P1} = 0$ при других i ; $\omega_{M1} = 1$ при $i = 1, 2$; $\omega_{M1} = 0$ при других i .

Узловая нагрузка, выраженная через напряжение в оттяжке:

$$\sigma_{Ri} = \frac{R_i}{F \cos \beta_i}$$

или в развернутом виде

$$\sigma_{Ri} = \frac{R_i}{F \cos \beta_i} \left[\frac{k q_i l_i}{4} (1 + \sin \beta_i^2) + \frac{q_i H_i}{2} + \frac{q_{i+1} H_{i+1}}{2} + \omega_{Pi} P_A + (-1)^{i-1} \omega_{Mi} \frac{M_A}{L_1} \right],$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $\omega_{P1} = 1$ при $i = 1$; $\omega_{P1} = 0$ при других i ; $\omega_{M1} = 1$ при $i = 1, 2$; $\omega_{M1} = 0$ при других i .

Приведенная линейная нагрузка на j -ю оттяжку i -го яруса, отнесенная к единице площади сечения оттяжки:

$$P_{ijz} = \frac{1}{F} \sqrt{\left\{ g_i \cos \beta_i + \omega_{qj} q_i \cos \left[\frac{360^\circ}{k} (j-1) - \varphi_z \right] \right\}^2 + \left\{ \omega_{qj} q_i \sin \left[\frac{360^\circ}{k} (j-1) - \varphi_z \right] \right\}^2},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, \dots, k$; $z = 1, 2$; $\omega_{qj} = 0$ при $j = 0$; $\omega_{qj} = 1$ при $j \neq 0$; $\varphi_z = 0^\circ$ при $z = 0$; $\varphi_k = 180^\circ/k$ при $z = 2$.

Коэффициент j -й оттяжки i -го яруса:

$$A_{ijz} = \frac{(p_{ijz} l_i)^2 E}{24},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, \dots, k$; $z = 1, 2$.

Монтажное напряжение в оттяжке:

$$\sigma_0 = \frac{T_0}{F}.$$

Коэффициент исходного состояния оттяжки:

$$B_i = \delta_c - \frac{A_{i0}}{\delta_0^2} - \alpha E \Delta t.$$

Количество оттяжек в плане $k = 3$

Напряжение в наветренной оттяжке:

$$\sigma_{i1z} = \sigma_{Ri} (\cos \varphi_z + 0,58 \sin \varphi_z) + \sqrt{\frac{A_{i3z}}{3(\sigma_{i1z} - B_i) - 2R_i \cos \varphi_z - \frac{A_{i1z}}{\sigma_{i1z}^2} - \frac{A_{i2z}}{\sigma_{i2}^2}}},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $z = 1, 2$; $\varphi_z = 0^\circ$ при $z = 1$; $\varphi_z = 180^\circ/k$ при $z = 2$.

Напряжение в подветренных оттяжках:

$$\sigma_{i2z} = \sigma_{i1z} - \sigma_{Ri} (\cos \varphi_z - 0,58 \sin \varphi_z);$$

$$\sigma_{i3z} = \sigma_{i1z} - \sigma_{Ri} (\cos \varphi_z + 0,58 \sin \varphi_z).$$

Осадка i -й опоры:

$$y_{iz} = \frac{l_i}{E \cos \beta_i \cos \varphi_z} \left(\sigma_{i1z} - \frac{A_{i1z}}{\sigma_{i1z}^2} - B_i \right).$$

Податливость и жесткость i -й опоры соответственно:

$$\delta_{iz} = 100 \frac{y_{iz}}{R_i}; \quad v_{iz} = 0,01 \frac{R_i}{y_{iz}}.$$

Усилие в j -й оттяжке i -го яруса:

$$T_{ijz} = \sigma_{ijz} F, \text{ где } j = 1, 2, \dots, k.$$

Продольная сила в i -м пролете:

$$N_{iz} = G_A + \sum g_{c(i-1)} L_{i-1} + \sum T_{ijz} \sin \beta_i.$$

Количество оттяжек в плане $k = 4$

Напряжение в наветренной оттяжке:

$$\sigma_{i1z} = \sigma_{Ri} \cos \varphi_z + \sqrt{\frac{A_{i3z}}{2(\sigma_{i1z} - B_i) - \sigma_{Ri} \cos \varphi_z - \frac{A_{i1z}^4}{\sigma_{i1z}^2}}},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $z = 1, 2$; $\varphi_z = 0^\circ$ при $z = 1$; $\varphi_z = 180^\circ/k = 45^\circ$ при $z = 2$.

Напряжение в подветренной оттяжке:

$$\sigma_{i3z} = \sigma_{i1z} - \sigma_{Ri} \cos \varphi_z.$$

Напряжение в боковых оттяжках:

$$\sigma_{i2z} - \frac{A_{i2z}}{\sigma_{i2z}^2} - B_i = 0 \text{ при } \varphi_z = 0^\circ;$$

$$\sigma_{i1} = \sigma_{i2}; \sigma_{i3} = \sigma_{i4} \text{ при } \varphi_z = 45^\circ.$$

Осадка i -й опоры:

$$x_{ij} = \frac{l_i}{E \cos \beta_i \cos \varphi_z} \left(\delta_{i1z} - \frac{A_{i1z}}{\delta_{i1z}^2} - B_i \right).$$

Податливость и жесткость i -й опоры соответственно:

$$\delta_{iz} = \frac{x_{iz}}{R_i} 100; \quad v_{iz} = 0,01 \frac{R_i}{y_{iz}}.$$

Выбор σ_{0i} по критерию:

$$\left| \frac{\Delta v_i}{\Delta \sigma_i} \right| \leq \left| \frac{v_i}{\sigma_{0i}} \right|.$$

Усилие в j -й оттяжке i -го яруса:

$$T_{ijz} = \sigma_{ijz} F, \text{ где } j = 1, 2, \dots, k.$$

Продольная сила в i -м пролете:

$$N_{iz} = G_A + \sum g_{c(i-1)} L_{i-1} + \sum T_{ijz} \sin \beta_i.$$

Второй этап. Расчет ствола мачты

Коэффициенты системы уравнений (число пролетов $n \leq 4$):

$$\mu_i = \frac{10^2 H_i}{\lambda_{i\text{прив}}} \sqrt{\frac{F_{ci}}{Y_{ci}}}; \quad \psi_{iz} = 10^2 H_i \sqrt{\frac{N_{iz}}{E_c Y_{ci} \mu_i}};$$

$$a_{iz} = \frac{6 \cdot 10^2}{\psi_{iz}^2} \left(\frac{\psi_{iz}}{\sin \psi_{iz}} - 1 \right) \frac{L_i}{E_c Y_{ci} \mu_i};$$

$$b_{iz} = \frac{6 \cdot 10^2}{\psi_{iz}^2} (1 - \psi_{iz} \operatorname{ctg} \psi_{iz}) \frac{L_i}{E_c Y_{ci} \mu_i};$$

$$c_{iz} = \frac{24 \cdot 10^6}{\psi_{iz}^3} \left(\operatorname{tg} \frac{\psi_{iz}}{2} - \frac{\psi_{iz}}{2} \right) \frac{L_i}{E_c Y_{ci} \mu_i};$$

$$\varepsilon_i = e_i \operatorname{tg} \beta_i.$$

Система уравнений при числе пролетов $n = 4$

Уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned} & a_{iz} M_A + (b_{1z} + b_{2z}) \bar{M}_{2z} + a_{2z} \bar{M}_{3z} + \left(a_{1z} \varepsilon_1 v_1 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_{11}} \right) x_{1z} + \\ & + \left(a_{2z} \varepsilon_2 v_2 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_1} - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} \right) x_{2z} + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} x_{3z} = -c_{1z} \frac{q_{c1} H_1^2}{4 \mu_1} - c_{2z} \frac{q_{c2} H_2^2}{4 \mu_2}; \\ & a_{2z} \bar{M}_{2z} + (b_{2z} + b_{3z}) \bar{M}_{3z} + a_{3z} \bar{M}_{4z} + \left(a_{2z} \varepsilon_2 v_2 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} \right) x_{2z} + \\ & + \left(b_{3z} \varepsilon_3 v_3 - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_3} \right) x_{3z} + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_3} x_{4z} = -c_{2z} \frac{q_{c2} H_2^2}{4 \mu_2} - c_{3z} \frac{q_{c3} H_3^2}{4 \mu_3}; \\ & a_{3z} \bar{M}_{3z} + (b_{3z} + b_{4z}) \bar{M}_{4z} + \left(a_{3z} \varepsilon_3 v_3 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_3} \right) x_{3z} + \\ & + \left(b_{4z} \varepsilon_4 v_4 - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_3} - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_4} \right) x_{4z} = -c_{3z} \frac{q_{c3} H_3^2}{4 \mu_3} - c_{4z} \frac{q_{c4} H_4^2}{4 \mu_4}. \end{aligned}$$

Уравнения равновесия сил на опоре:

$$\begin{aligned}
 & \frac{M_A}{L_1} - \frac{\bar{M}_{2z}}{L_1} + \frac{N_{1z}}{L_1} x_{2z} + \left(10^2 v_1 + \frac{\varepsilon_1 v_1}{L_1} - \frac{N_{1z}}{L_1} \right) x_{1z} = R_1; \\
 & -\frac{M_A}{H_1} + \left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{L_2} \right) \bar{M}_{2z} - \frac{\bar{M}_{3z}}{H_2} + \left(\frac{N_{1z}}{H_1} - \frac{\varepsilon_1 v_1}{H_1} \right) x_{1z} + \\
 & + \left(10^2 v_2 + \frac{\varepsilon_2 v_2}{H_2} - \frac{N_{1z}}{H_1} - \frac{N_{2z}}{H_2} \right) y_{2z} + \frac{N_{2z}}{H_2} x_{3z} = R_2; \\
 & -\frac{\bar{M}_{2z}}{H_2} + \left(\frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_3} \right) \bar{M}_{3z} - \frac{\bar{M}_{4z}}{H_3} + \left(\frac{N_{2z}}{H_2} - \frac{\varepsilon_2 v_2}{H_2} \right) x_{2z} + \\
 & + \left(10^2 v_3 + \frac{\varepsilon_3 v_3}{H_3} - \frac{N_{2z}}{H_2} - \frac{N_{3z}}{H_3} \right) x_{3z} + \frac{N_{3z}}{H_3} x_{4z} = R_3; \\
 & -\frac{\bar{M}_{3z}}{H_3} + \left(\frac{1}{H_3} + \frac{1}{H_4} \right) \bar{M}_{4z} + \left(\frac{N_{3z}}{H_3} - \frac{\varepsilon_3 v_3}{H_3} \right) x_{3z} + \\
 & + \left(10^2 v_4 + \frac{\varepsilon_4 v_4}{H_4} - \frac{N_{3z}}{H_3} - \frac{N_{4z}}{H_4} \right) x_{4z} = R_4.
 \end{aligned}$$

Неизвестными в этой системе уравнений являются: $\bar{M}_{2z}$; $\bar{M}_{3z}$; $\bar{M}_{4z}$; x_{1z} ; x_{2z} ; x_{3z} ; x_{4z} .

Система уравнений при числе пролетов $n = 3$

Уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned}
 & a_{1z} M_A + (b_{1z} + b_{2z}) \bar{M}_{2z} + a_{3z} \bar{M}_{3z} + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} y_{3z} + \left(a_{1z} \varepsilon_1 v_1 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_1} \right) x_{1z} + \\
 & + \left(b_{2z} \varepsilon_2 v_2 - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_1} - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} \right) x_{2z} = -c_{1z} \frac{q_{c1} L_1^2}{4\mu_1} - c_{2z} \frac{q_{c2} L_2^2}{4\mu_2};
 \end{aligned}$$

$$a_{2z}\bar{M}_{2z} + (b_{2z} + b_{3z})\bar{M}_{3z} + \left(a_{2z}\varepsilon_2 v_2 + \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2}\right)x_{2z} + \\ + \left(b_{3z}\varepsilon_3 v_3 - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_2} - \frac{6 \cdot 10^{-2}}{H_3}\right)x_{3z} = -c_{2z} \frac{q_{c2} L_2^2}{4\mu_2} - c_{3z} \frac{q_{c3} L_3^2}{4\mu_3}.$$

Уравнения равновесия сил на опоре:

$$\frac{M_A}{H_1} - \frac{\bar{M}_{2z}}{H_1} + \frac{N_{1z}}{H_1} x_{2z} + \left(10^2 v_1 + \frac{\varepsilon_1 v_1}{H_1} - \frac{N_{1z}}{H_1}\right)x_{1z} = R_1; \\ -\frac{M_A}{H_1} + \left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2}\right)\bar{M}_{2z} - \frac{\bar{M}_{3z}}{H_2} + \frac{N_{2z}}{H_2} x_{3z} + \\ + \left(10^2 v_2 + \frac{\varepsilon_2 v_2}{H_2} - \frac{N_{1z}}{H_1} - \frac{N_{2z}}{H_2}\right)x_{2z} - \left(\frac{\varepsilon_1 v_1}{L_1} - \frac{N_{1z}}{L_1}\right)x_{1z} = R_2; \\ -\frac{\bar{M}_{2z}}{H_2} + \left(\frac{1}{H_2} + \frac{1}{H_3}\right)\bar{M}_{3z} + \left(\frac{N_{2z}}{H_2} - \frac{\varepsilon_2 v_2}{H_2}\right)x_{2z} + \\ + \left(10^2 v_3 + \frac{\varepsilon_3 v_3}{H_3} - \frac{N_{2z}}{H_2} - \frac{N_{3z}}{H_3}\right)x_{3z} = R_3.$$

Неизвестными в этой системе уравнений являются: $\bar{M}_{2z}$; $\bar{M}_{3z}$; x_{1z} ; x_{2z} ; x_{3z} .

Расчет ствола мачты на прочность и устойчивость:

$$\bar{M}_{i\max} = M_A; \\ \operatorname{tg}\left(\frac{\psi_i}{H_i} x_i\right) = \frac{m_i + \frac{q_{ci} H_i^2}{\mu_i \psi_i^2} - \left(m_{i+1} + \frac{q_{ci} H_i^2}{\mu_i \psi_i^2}\right) \cos \psi_i}{\left(\bar{M}_{i+1} + \frac{q_{ci} H_i^2}{\mu_i \psi_i^2}\right) \sin \psi_i} \rightarrow x_i,$$

где $\bar{M}_i$, $\bar{M}_{i+1}$ — наибольшие из $\bar{M}_{iz}$ и $\bar{M}_{(i+1)z}$ соответственно; ψ — для значения z , где $\bar{M}_i$ наибольшее.

$$\bar{M}_{i\max} = \frac{\bar{M}_{i+1}}{\cos \frac{\Psi_i}{H_i} x_i} + \frac{q_{ci} H_i^2}{\mu_i \Psi_i^2} \frac{1 - \cos \frac{\Psi_i}{L_i} x_i}{\cos \frac{\Psi_i}{H_i} x_i};$$

$$\sigma_i = \frac{N_i}{F_{ci} \Phi_{ci}^Y} + \frac{10^2 m_{i\max}}{w_{ci}} \leq [\sigma];$$

$$\sigma_{in} = \frac{N_i + m N_{mi}}{F_{ci} \Phi_{ci}^Y} \leq [\sigma],$$

где N_i — для того значения z , где $\bar{M}_i$ наибольшее.

Угловое смещение вершины мачты:

$$u = 50 H_1 \sqrt{\frac{N_1}{EJ_{c1}}};$$

$$\theta_1 = a_{2c} \operatorname{tg} \frac{x_1 - x_2}{H_1};$$

$$\theta_2 = \frac{10^4 M_A H_1}{EJ_{c1}} \left(\frac{1}{2u \operatorname{tg} 2u} - \frac{1}{4u^2} \right) \frac{180^\circ}{\pi};$$

$$\theta_\Sigma = \theta_1 + \theta_2.$$

Расчет мачты на устойчивость

Расчет коэффициентов уравнений устойчивости:

$$\alpha_i = v_i \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{10^2 H_i} \right);$$

$$S_i = \frac{N_i}{10^2 H_i}, \text{ где } N_i \text{ — наибольшее из значений } N_{iz}.$$

При $n = 1$

$$B_1 = \frac{\alpha_1}{S_1}.$$

При $n = 2$

$$B_1 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} + \frac{\alpha_1}{S_1};$$

$$B_2 = \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2}.$$

При $n = 3$

$$B_1 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} + \frac{\alpha_1}{S_1};$$

$$B_2 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2};$$

$$B_3 = \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3}{S_3}.$$

При $n = 4$

$$B_1 = \frac{\alpha_1}{S_1} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{S_4};$$

$$B_2 = \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4}{S_4} +$$

$$+ \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{S_4} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{S_3} \frac{\alpha_4}{S_4};$$

$$B_3 = \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3}{S_3} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{S_4} + \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{S_3} \frac{\alpha_4}{S_4} +$$

$$+ \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{S_3} \frac{\alpha_4}{S_4};$$

$$B_4 = \frac{\alpha_1}{S_1} \frac{\alpha_2}{S_2} \frac{\alpha_3}{S_3} \frac{\alpha_4}{S_4}.$$

Уравнения устойчивости

$$(-1)^n \lambda^n + (-1)^{n-1} B_1 \lambda^{n-1} + (-1)^{n-2} B_2 \lambda^{n-2} \dots B_{n-2} \lambda^2 - B_{n-1} \lambda + B_n = 0.$$

При $n = 1$

$$\lambda = B_1.$$

При $n = 2$

$$\lambda^2 - B\lambda + B_2 = 0 \rightarrow \lambda.$$

При $n = 3$

$$-\lambda^3 + B_1 \lambda^2 - B_2 \lambda + B_3 = 0 \rightarrow \lambda.$$

При $n = 4$

$$\lambda^4 - B_1 \lambda^3 + B_2 \lambda^2 - B_3 \lambda + B_4 = 0 \rightarrow \lambda.$$

Расчет гибких нитей

Гибкая нить под действием распределенной нагрузки

Рассмотрим идеально гибкую невесомую нить длиной L_0 , закрепленную в точках A и B , расположенных на разном уровне (рис. 1). До тех пор, пока к ней не приложена какая-либо внешняя нагрузка, такая нить является геометрически изменяемой системой и ее форма неопределенна.

Нагрузим нить произвольной вертикальной нагрузкой, интенсивность которой $q(x_1)$ отнесена к единице длины проекции нити

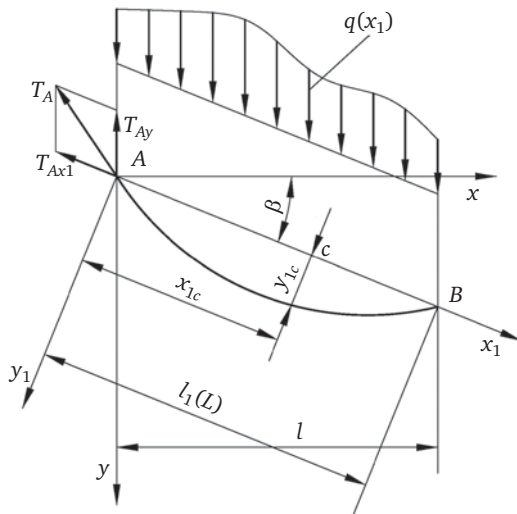


Рис. 1. Схема расчета гибкой нити

на ось x_1 . При этом нить занимает вполне определенное положение. Найдем форму провисания нити в координатах $x_1 y_1$.

В идеально гибкой нити изгибающий момент в любом сечении равен нулю. Приравняв к нулю момент всех сил слева от произвольной точки c , получим

$$M_c = T_{Ay} x_{1c} \cos \beta - T_{Ax1} y_{1c} - \int_0^l q(x_1)(x_{1c} - x_1) \cos \beta dx_1 = 0.$$

Решая уравнение относительно y_{1c} , получим

$$y_{1c} = \frac{T_{Ay} x_{1c} \cos \beta - \int_0^{x_{1c}} q(x_1)(x_{1c} - x_1) \cos \beta dx_1}{T_{Ax1}}. \quad (1)$$

Проецируя все силы на ось x_1 , получим

$$T_{Ax1} = T_{Bx1} = T_{x1}.$$

Числитель в выражении (1) представляет изгибающий момент в условной шарнирно опертой балке AB , загруженной той же нагрузкой, что и нить. Обозначив его M_c , можно записать

$$y_{1c} = M_c / T_{x1}. \quad (2)$$

Так как функция $M_c = f(x)$ при заданной нагрузке q известна, то равенство (2) определяет ординаты провисания нити с точностью до множителя $1/T_{x1}$. Продифференцировав дважды равенство (2), получим

$$d^2 y / dx_1^2 = -q(x_1) / T_{x1}. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение (3) является приближенным, потому что нагрузка $q(x_1)$ отнесена к единице длины проекции нити на ось x_1 . Если нагрузка q_s связана с длиной нити dS , то из равенства

$$q(x_1) dx_1 = q_s dS$$

найдем

$$q(x_1) = q_s dS / dx_1.$$

Так как

$$dS = \sqrt{1 + y_1'^2} dx_1,$$

то
$$q(x_1) = q_s \sqrt{1 + y_1'^2}.$$

Подставив это значение в (3), получим уравнение

$$T_{x1}y_1'' + q_s \sqrt{1 + y_1'^2} = 0. \quad (4)$$

Например, для $q = \text{const}$ решением уравнения (3) является квадратная парабола, а уравнения (4) — цепная линия. Однако при малых стрелах провисания эти кривые мало отличаются.

Так как рассматриваются достаточно пологие нити ($y_1'^2 \ll 1$), то $q_s \approx q(x_1)$. Поэтому можно считать справедливым уравнение (2) или (3). При $y_{1c} \leq 0,1L$ с точностью до 5% принимаем $T_{x1} = T$. Следовательно,

$$y_{1c} = M_c / T. \quad (5)$$

Когда $q(x_1) = q$, из (5) получим

$$y_{1c} = \frac{qx_1(l_1 - x_1)}{2T} \cos \beta = \frac{qx(l - x)}{2T \cos \beta}, \quad (6)$$

где $l_1 = l / \cos \beta$ — длина хорды нити (прямая AB).

Ордината y , отсчитываемая от прямой AB , равна $(y - y_{1c}) / \cos \beta$. Уравнение (5) позволяет определить форму нити, если известны натяжение T и внешняя нагрузка $q(x_1)$. Но в процессе эксплуатации внешние факторы, такие как нагрузка $q(x_1)$ и температура, изменяются, вызывая соответственно упругое и термическое удлинение нити. В результате форма нити изменяется. К тому же результату приводит и смещение точек закрепления нити, вызываемое податливостью опор. Так, сближение опор A и B (см. рис. 1), вызывающее уменьшение пролета на величину ΔL_n , эквивалентно увеличению температуры окружающей среды пропорционально ΔL_T .

Предположим, что в начальном состоянии нить испытывает действие нагрузки интенсивностью $q_0(x_1)$. Натяжение нити при этом равно T_0 , а длина L_0 .

Пусть нагрузка на нить изменилась и равна $q(x_1)$. При этом нить займет новое положение, ее натяжение стало T_1 , а длина — L_1 . Удлинение, которое получила нить с учетом температурной деформации и смещения опор, составит

$$\Delta L_1 = L - L_0 = \Delta L_y + \Delta L_T + \Delta L_n, \quad (7)$$

где ΔL_y — удлинение, вызываемое упругой деформацией; $\Delta L_T = \alpha l_1 \Delta t$ — термическое удлинение; α — коэффициент температурного удлинения материала нити; $\Delta t = t_1 - t_0$ — температурный перепад; ΔL_n — сближение опор.

Если известны горизонтальная Δl и вертикальная Δv составляющие смещения опоры, то $\Delta L_n = \Delta l / \cos \beta + \Delta v \sin \beta$.

Согласно закону Гука

$$\Delta L_y = \frac{(T_1 - T_0) l_1}{E_B F_B}, \quad (8)$$

где E_B и F_B — соответственно модуль упругости материала нити и площадь ее сечения.

Чтобы определить ΔL , найдем длину нити путем интегрирования уравнения (4):

$$L = \int_{l_1} dS = \int_{l_1} \sqrt{1 + y_1'^2} dx_1.$$

Разложив подкоренное выражение в биномиальный ряд и ограничиваясь первым членом разложения, получим

$$L = \int_{l_1} (1 + 0,5 y_1'^2) dx_1. \quad (9)$$

Из (5) имеем

$$y_1' = \frac{1}{T} \frac{dM}{dx_1} = \frac{\cos \beta}{T} \frac{dM}{dx} = \frac{Q}{T} \cos \beta,$$

где Q — перерезывающая сила.

Подставляя полученное значение y_1' в (9), имеем

$$L = l_1 + \frac{\cos^2 \beta}{2T^2} \int_{l_1} Q^2 dx_1. \quad (10)$$

При $q(x_1) = \text{const}$ из (10) получим

$$L = l_1 \left(1 + \frac{q^2 l_1^2 \cos^2 \beta}{24T^2} \right).$$

Подставив (8) и (10) в (7), получим уравнение, характеризующее напряженно-деформированное состояние нити:

$$\frac{\cos^2 \beta}{2T_1^2} \int_{l_1} Q_1^2 dx_1 - \frac{\cos^2 \beta}{2T_0^2} \int_{l_1} Q_0^2 dx_1 = \frac{(T_1 - T_0)l_1}{E_B F_B} + \Delta L_T + \Delta L_{\Pi}$$

или

$$T_0 - \frac{\int_{l_1} Q_0^2 dx_1}{2l_1 T_0^2} E_B F_B \cos^2 \beta = T_1 - \frac{\int_{l_1} Q_1^2 dx_1}{2l_1 T_1^2} E_B F_B \cos^2 \beta + \frac{\Delta L_T + \Delta L_{\Pi}}{l_1}. \quad (11)$$

В уравнении (11) неизвестной является величина T_1 . Умножив левую и правую части на T_1^2 , это уравнение можно свести к виду

$$T_1^3 + AT_1^2 - B = 0, \quad (12)$$

где

$$A = \left(\frac{\int_{l_1} Q_0^2 dx_1}{2l_1 T_0^2} \cos^2 \beta + \Delta L_{\Pi} \right) \frac{E_B F_B}{l_1} - T_0;$$

$$B = \frac{\int_{l_1} Q_1^2 dx_1}{2l_1} E_B F_B \cos^2 \beta;$$

$$\Delta L_{\Pi} = \Delta L_T + \Delta L_{\Pi}.$$

Если $q_1(x_1) = q = \text{const}$, то из (11) следует

$$T_0 - \frac{q_0^2 l_1^2}{24T_0^2} E_B F_B \cos^2 \beta = T_1 - \frac{q_1^2 l_1^2}{24T_1^2} E_B F_B \cos^2 \beta + \frac{\Delta L_{\Pi}}{l_1} E_B F_B.$$

Часто бывает удобно выразить нагрузку через составляющую нормальную к хорде: $w = q \cos \beta$. При этом, принимая, что $L \approx l_1$, получаем

$$T_0 - \frac{w_0^2 L^2}{24T_0^2} E_B F_B = T_1 - \frac{w_1^2 L^2}{24T_1^2} E_B F_B + \frac{\Delta L_{\Pi}}{L} E_B F_B. \quad (13)$$

Принятая замена должна быть учтена и в выражении (5). Так, уравнение (6), являющееся частным случаем выражения (5), в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$y_1 = \frac{wx_1(L - x_1)}{2T}, \quad \text{а} \quad y_{1\max} = \frac{wL^2}{8T} = f_1.$$

Выразим уравнение (13) через напряжения. Для этого разделим его на F_B и обозначим

$$p = \frac{w}{F_B}; \quad \sigma = \frac{T}{F_B}.$$

Тогда

$$\sigma_0 - \frac{p_0^2 L^2}{24\sigma_0^2} E_B = \sigma_1 - \frac{p_1^2 L^2}{24\sigma_1^2} E_B + \frac{\Delta L_{\text{тп}}}{L} E_B. \quad (14)$$

Любое из уравнений (11)—(14) совместно с уравнением (5) полностью характеризует напряженно-деформированное состояние гибкой нити.

Гибкая нить под действием сосредоточенных сил

В расчетах систем, где нить нагружена сосредоточенными силами, расчетные уравнения для нити удобно выразить в дискретной форме через перемещения y_{1i} , нормальные к хорде, и узловые силы P_i (рис. 2).

Составим уравнение, связывающее узловые силы (рис. 3) и перемещения (индекс 1 для удобства опускается). Для i -го шарнирного звена (рис. 3, а), наклонного относительно направления действия силы T , поперечная сила (рис. 3, б) равна

$$Q_i = T(y_i - y_{i-1})/d.$$

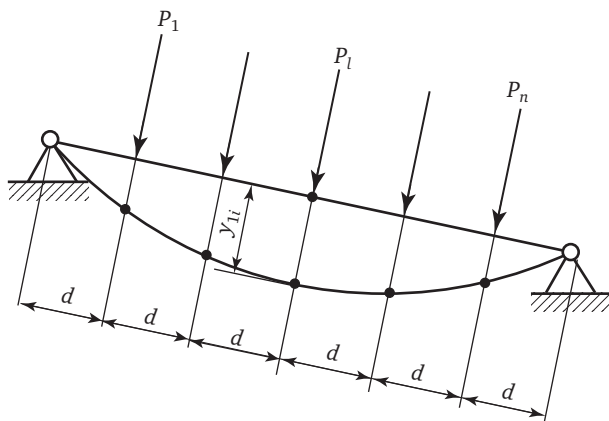


Рис. 2. Расчетная схема гибкой нити под действием сосредоточенных сил

$$\frac{d}{2} \left(\sum_1^n y'_{1i}{}^2 - \sum y'_{0i}{}^2 \right) = \frac{T_1 - T_0}{E_B F_B} \sum_1^n d - \sum_1^n \Delta d_{\text{тп}},$$

где $L = \sum_1^n d$.

Производную y'_i выразим в конечных разностях

$$y'_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{d}.$$

Тогда соотношение после простых преобразований можно выразить в матричной форме:

$$0,5 \bar{y}_1^T [q] \bar{y}_1 - \frac{T_1 d}{E_B F_B} \bar{e} \bar{e}^T = 0,5 \bar{y}_0^T [q] \bar{y}_0 - \frac{T_0 d}{E_B F_B} \bar{e} \bar{e}^T - \Delta d_{\text{тп}} \bar{e} \bar{e}^T, \quad (17)$$

где $\bar{e}$ — вектор-столбец, состоящий из n единиц.

Полученное выражение позволяет составлять уравнения по методу сил, перемещений или смешанному методу для нити, нагруженной сосредоточенными силами, а также и для систем, в которые нить входит как элемент конструкции.

Расчет проводов и канатов

Гибкая нить является расчетной схемой токонесущих проводов и леерных канатов линейных антенн, а также других гибких элементов, например оттяжек мачт.

Далее приведены формулы для расчета гибкой нити при стреле провеса $[f] \leq 0,1L$, где L — длина пролета (рис. 4):

$$f_1 = \frac{WL^2}{8T}; \quad (18, a)$$

$$f_1 = f \cos \beta; \quad (18, б)$$

$$\sigma_0 - \frac{P_0^2 L^2}{24 \sigma_0^2} E = \sigma_1 - \frac{P_1^2 L^2}{24 \sigma_1^2} E + \frac{\Delta}{L \cos \beta} E, \quad (19)$$

где $\sigma_0 = T_0/F_b$; $\sigma_1 = T_1/F_b$; T_0 — начальное монтажное натяжение; T_1 — натяжение под действием эксплуатационной нагрузки;

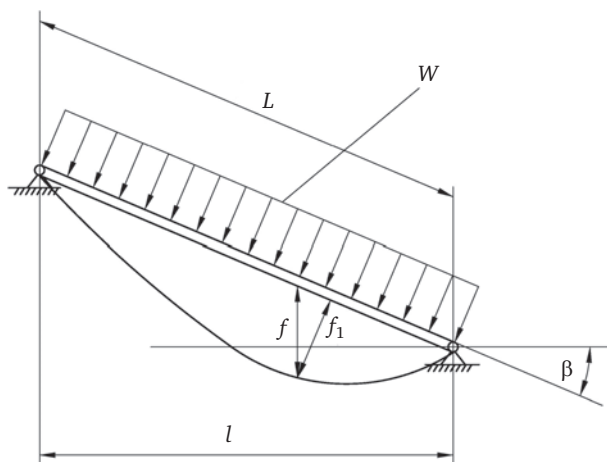


Рис. 4. Схема расчета проводов и канатов

F_b — расчетная площадь поперечного сечения нити; L — длина нити, принимаемая равной длине хорды; E — модуль упругости; $p_{0(1)} = W_0 / F_b$ — приведенная нагрузка; W_0, W_1 — монтажная и эксплуатационная погонные нагрузки соответственно, направленные по нормали к хорде и принимаемые постоянными по длине хорды; β — угол наклона хорды к горизонту.

Если g — вертикальная, а q — горизонтальная нагрузка под углом φ к плоскости пролета, то

$$W = \sqrt{(g \cos \varphi + q \cos \beta \sin \varphi)^2 + (q \sin \varphi)^2}. \quad (20)$$

При расчете проволочных антенн принимают $\varphi = 90^\circ$;

$$\Delta = \Delta_t \cos \beta + \Delta_{\pi},$$

где $\Delta_t = \alpha \Delta t L$ — температурное удлинение нити

$$\Delta t = t_1 - t_0;$$

t_1 и t_0 — температура монтажа и эксплуатации соответственно; Δ_{π} — уменьшение пролета в результате смещения опор.

Учебное издание

КРАХИН ОЛЕГ ИВАНОВИЧ
ЛЕВИТАН БОРИС АРКАДЬЕВИЧ
КУЗНЕЦОВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ

**Стационарные антенны.
Расчет и проектирование конструкций**

Редактор *Т.В. Рыбакова*
Дизайнер переплёта *Н.А. Свиридова*
Компьютерная верстка *В.В. Дёмкин*
Корректор *М.Я. Барская*

Сдано в набор 04.12.13. Подписано в печать 11.02.14.
Формат 60×88 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура PT Serif.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,7. Уч.-изд. л 14,87.

ООО «Издательство Машиностроение»,
107076, Москва, Стромынский пер., 4.
www.mashin.ru

Отпечатано способом ролевой струйной печати
в ОАО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская обл., г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1

ISBN 978-5-94275-743-4



9 785942 757434