



А.В. Перельмутер

ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Москва, 2015

А.В. Перельмутер

ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

*Издание второе,
переработанное и дополненное*



Издательство СКАД Софт Издательство АСВ
Москва 2015



УДК 693.972

Перельмутер А.В.

Очерки по истории металлических конструкций: Издание второе, перераб. и дополн. — М.: Издательство СКАД Софт, Издательство АСВ, 2015 — 275 с.

В книге собраны отдельные очерки по истории развития металлических конструкций. Она отличается от обычных вступительных глав учебника по курсу стальных конструкций тем, что рассматривает более широкий круг вопросов. Основное внимание уделяется развитию конструкторских идей, а не отдельным примерам удачных конструктивных решений. Последние только иллюстрируют появление той или иной конструкторской идеи. Очень широка и география обзора. А что касается временных рамок, то большое внимание отдано начальным этапам развития стальных конструкций, менее знакомым современному инженерному корпусу.

Книга предназначена для широкого круга лиц интересующихся историей развития стальных конструкций: для инженеров, преподавателей, студентов и аспирантов.

ISBN

© Перельмутер А.В., 2015

© Издательство СКАД Софт, 2015

© Издательство АСВ, 2015

Введение

*Уважение к минувшему — вот черта,
отличающая образованность от
дикости.*

А.С. Пушкин

Практически каждый учебник по курсу металлических конструкций предваряет основной текст разделом, посвященным истории развития металлических конструкций (см., например, [2] или [19]). Полезность такого введения в профессию представляется несомненной, ведь изучение даже так называемых устаревших конструкторских идей будит творческую мысль и, безусловно, расширяет профессиональный кругозор.

Но, к сожалению, в отечественных изданиях изложение истории развития конструкторской мысли и строительной практики часто продолжает следовать установленной в свое время традиции, которая предусматривала если не полное замалчивание, то достаточно скудное предоставление фактов, относящихся к зарубежному опыту. Так, например, после беглого описания некоторых построек, относящихся к выполненным в России старым металлическим конструкциям, автор пособия для студентов [15] снисходительно замечает: «Параллельно с развитием металлостроения в России, расширяется его использование и в западных странах».

В предлагаемых очерках автор в меру своих возможностей постарался уклониться от указанной традиции. С использованием доступных через Интернет сведений сделана попытка более объективного взгляда на исторические факты, и не вина автора, что некоторые из них связаны с крушением привычных мифов. При этом часто можно было воспользоваться уже написанными обзорами, сопоставляя их между собой и делая соответствующие выводы.

В книге более пристальное внимание уделяется начальным этапам развития конструктивной формы. Это связано с желанием осветить факты менее знакомые большинству современных инженеров, и, кроме того, с желанием отдать дань уважения и признательности тем первопроходцам, которые создали замечательную профессию проектировщика стальных конструкций.

Инженеры прошлого знали о работе конструкции гораздо меньше, чем это требуется для детального предсказания ее поведения под нагрузкой, но зато они обладали интуитивным чувством распределения напряжений, отнюдь не всегда присущим

современным инженерам, у которых нормативные регламентации и компьютерные программы изгнали интуицию. Поэтому автор посчитал, что описание прошлого опыта может служить еще и стимулом для более глубокого «чувства конструкции», чувства, по нашему мнению, абсолютно необходимого конструктору.

Мы соревнуемся со своими предшественниками, сопоставляем наши конструкции с классическим наследием и радуемся, когда побеждаем в этом заочном состязании. Но наше поведение как минимум неспортивно, поскольку современные возможности анализа существенно выросли. И если бы нас поставить в равные условия, то неизвестно, кто бы оказался победителем.

Задумывалось так, чтобы очерки могли читаться независимо, и поскольку многие их элементы переплетаются, не удастся избежать некоторых повторов. Что касается тематического отбора, то он был продиктован личными интересами и пристрастиями автора. Тематика очерков не претендует на всеобъемлющее представление истории металлических конструкций и, безусловно, является фрагментарной. Для читателей, которые при этом оказываются неудовлетворенными, у автора имеется лишь один, основанный на собственном опыте, совет — проведите самостоятельный поиск, это занятие может быть очень увлекательным.

Для такого поиска можно рекомендовать следующие веб-сайты:

<http://en.structurae.de/>

<http://skyscraperpage.com/diagrams/>

<http://www.twirpx.com/files/pgs/metallic/>

<http://www.construction-history.com/>

Рукопись этой книги внимательно прочли и сделали ряд полезных замечаний и предложений профессора Вадим Николаевич Гордеев, Альберт Иванович Лантух-Лященко и Сергей Федорович Пичугин. Автор глубоко признателен этим друзьям и коллегам за их неоценимую помощь.

Очерк первый. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Говорить о металлических конструкциях и не рассматривать материал, из которого они создаются, по-видимому, нельзя. Для металлических конструкций существует определенное отличие от конструкций из других материалов — там материальная основа относится к тому, что называют «строительным материалом», в то время как металл вряд ли можно назвать таким образом.

Металлы сопровождают практически всю историю развития цивилизации, а история строительных конструкций из металла гораздо короче. Поэтому, говоря о материале для металлических конструкций, приходится рассматривать развитие металлургической промышленности как самостоятельный и определяющий процесс.

Считается, что технология получения железа из руды и выплавка металла на основе железа была изобретена хеттами примерно в 1200 году до н. э. В расшифрованных хеттских текстах XIX века до н.э. упоминается о железе как о металле, «упавшем с неба». Секрет добычи и изготовления железа стал ключевым фактором могущества филистимлян.

В конце II тысячелетия до н.э. железо появилось в Закавказье. Пришедшие в Европу народы с Востока внесли свой вклад в распространение металлургии. По преданию, колыбелью монголов и туркменов были богатые рудами Алтайские горы. Богатые традиции производства изделий из железа имеются в Китае. Здесь, возможно ранее, чем у других народов, научились получать жидкий чугун и делать из него отливки. До наших дней сохранились некоторые уникальные отливки из чугуна, изготовленные в первом тысячелетии н.э., например, колокол высотой 4 и диаметром 3 метра, массой 60 тонн.

Известны уникальные изделия металлургов древней Индии. Классическим примером является знаменитая вертикально стоящая Кутубская колонна в Дели массой 6 тонн, высотой 7,5 метров и диаметром 40 см. На колонне нет ржавчины. Надпись на колонне гласит, что она сооружена примерно в 380—330 годах до н.э. Таким образом,

следы развития чёрной металлургии можно отследить во многих прошлых культурах и цивилизациях.



Рис. 1.1. Железная колонна в Дели (Кутубская колонна)

В этих очерках, посвященных металлическим конструкциям, мы не будем говорить о конструкциях из алюминиевых сплавов, речь будет идти лишь о конструкциях из трех видов сплавов железа и углерода — о чугуне, сварочном железе и литом железе (стали).

Развитие сталеплавильного производства

Прямое получение железа из руды

В глубокой древности железо получали путем его восстановления из руды в примитивных горнах. Поскольку в этом процессе использовалось «сырое» дутье (не подогретый воздух), способ получил название «сыродутный».

Сущность сыродутного способа получения железа заключается в следующем: в горн (рис. 1.2) загружают древесный уголь и железную руду, уголь разжигают и начинают подавать дутье; по мере сгорания и «оседания» угля руда опускается, подвергаясь непрерывному кон-

такту с восстановительными газами и раскаленным углем и постепенно при этом восстанавливаясь.

В результате процесса получали раскисленный ком («крицу») восстановленного железа (с прожилками шлака), который вытаскивали из горна и обрабатывали молотами, уплотняя крицу и выдавливая из нее шлак.

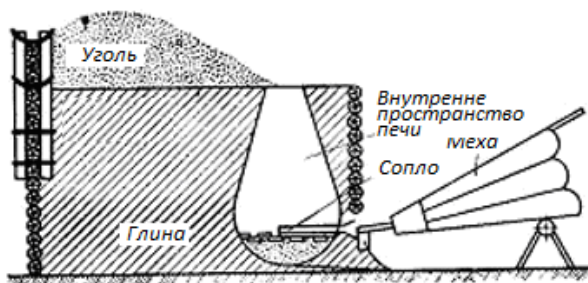


Рис. 1.2. Вертикальный разрез сыродутной печи

Получение кричного (сварочного) железа из чугуна

По мере усовершенствования сыродутного процесса горны строили все большей вместимости, более высокими, подачу дутья интенсифицировали; это привело к повышению температуры в горне и к более продолжительному пребыванию шихтовых материалов в зоне высоких температур.

Усиление воздуходувных средств, благодаря применению водяного привода, привело к развитию в печи более высокой температуры, чем прежде. В результате в ряде случаев происходило заметное науглероживание железа, и продуктом процесса оказывалось не низкоуглеродистое железо, а высокоуглеродистое, т. е. чугун. Чугун не обладает пластическими свойствами (не куется, не сгибается и т.п.); часто его считали нежелательным продуктом и выбрасывали. Однако было замечено, что при загрузке в горн чугуна вместо железной руды или в случае продолжения операции из оставленной в горне высокоуглеродистой крицы также получается низкоуглеродистая железная крица. Такой двухстадийный процесс (вначале выплавка чугуна, а потом получение из чугуна низкоуглеродистого металла) как более производительный привел к возникновению более совершенного способа производства железа, получившего название *кричный процесс*. Дата появления кричного процесса, так же как и сыродутного, неизвестна, но уже в XII-XIII вв. кричный способ был распространен.

Таким образом, сущность кричного способа переработки чугуна в железо и сталь заключается в расплавлении чугуна в горне на древес-

ном угле и окислении углерода, кремния, марганца и других примесей чугуна кислородом дутья и действием шлаков, богатых оксидами железа.

По мере выгорания примесей чугуна (в частности, углерода) повышается температура его плавления. Температура в горне достаточна для расплавления чугуна, но недостаточна для поддержания в жидком виде образующегося низкоуглеродистого сплава. В результате по мере выгорания примесей металл становится все более тугоплавким и все более вязким. Наступает момент, когда на дне горна образуется зернистая тестообразная железистая масса, которую собирают в один общий ком (крицу), достают из горна и обжимают под молотом, чтобы удалить из металла шлак и получить возможно более плотный и однородный кусок железа.

В связи с тем что горючие материалы, применяющиеся в кричном производстве, находятся в непосредственном контакте с металлом, они должны быть чистыми от золы и вредных примесей. Таким требованиям лучше всего удовлетворяет древесный уголь.

В 15 в. происходит ряд открытий и завоеваний новых земель, начинается упадок феодализма, и появляются у европейских государств колониальные владения. Все это увеличивает потребность в металле и вызывает более быстрый рост металлургии, но главным образом лишь в количественном отношении. В ряде стран Центральной Европы к 16 веку значительно сократились лесные площади (что вызвало даже специальные законодательные акты, ограничивающие выжиг угля). Главными поставщиками черных металлов на европейском рынке до конца 16 в. становятся страны, обладающие мощными лесными массивами: Швеция, Норвегия, Россия и Австрия. Узким местом явилось и несовершенство способа переделки чугуна в железо.

Низкая производительность и дороговизна кричного передела способствовала поиску более производительного способа получения железа, причем такого, при котором можно было заменить чистый древесный уголь другим, более дешевым и менее дефицитным топливом. В 1784г. англичанин Генри Корт (Henry Cort) предложил получать сталь окислительным плавлением чугуна на поду отражательной печи — способ, позволяющий сжигать в топке печи любое горючее (топка была отделена от ванны металла).

Генри Корт использовал отражательную пламенную печь, изобретенную Ровенсоном (John Rovinson) в начале XVII века, но технически эта печь была далеко несовершенна. Генри Корт усовершенствовал печь, для чего в поде отражательной печи была сделана впадина, в которой собирался расплавленный металл. Во впадине образовыва-

лась лужа (puddle) из расплавленного металла, и этот процесс получил название *пудлингования*. Этот металл энергично перемешивался железными ломиками в виде весел, причем углерод выгорал за счет окислительных газов атмосферы печи, и на дне впадины собирался большой ком сварочного железа, который вынимался из печи и подвергался проковке. Чистота горючего уже не играет такой роли, как при кричном переделе, так как непосредственный контакт горючего с металлом отсутствует (рис. 1.3).

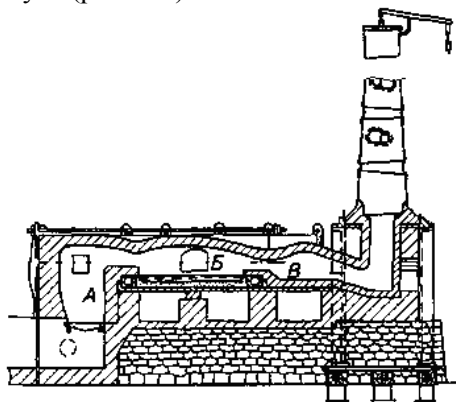


Рис. 1.3. Схема пудлинговой печи: *A* — топка;
B — рабочее пространство; *B* — камера предварительного подогрева
чугуна отходящими газами

С 1830 г. по предложению англичанина Дж. Галла (Joseph Hall) подины пудлинговых печей стали делать из материалов, богатых оксидами железа: богатой железной руды, окалина (подины первых печей делали из песка). Операция пудлингования сводится к следующему: после необходимого по окончании предыдущей операции исправления пода на него загружают предварительно подогретый чугун. Расплавление чугуна сопровождается окислением его примесей. За периодом расплавления следует так называемое «вымешивание»: температуру на короткий промежуток времени несколько снижают (чтобы добиться более полного контакта металла со шлаком), и рабочие (пудлингеры) перемешивают металл и шлак клюкой (или ломом). Источниками образующегося шлака являются: подина, специально добавляемая окалина, железная руда, а также железо и примеси чугуна, окисляемые в атмосфере печи.

К недостаткам пудлингового процесса относятся: высокий расход топлива, низкая производительность, низкий выход годного, невозможность получения литой стали. Несмотря на большие инженерные

усилия с целью повышения производительности и уменьшения трудоемкости пудлингового процесса, этот процесс не выдержал конкуренции с появившимся конвертерным, а затем мартеновским производством.

Одним из существенных недостатков и кричного, и пудлингового процессов является невозможность получения плотной литой отливки из стали, так как и в кричных горнах, и в пудлинговых печах температура оказывалась недостаточной для расплавления металла. Получаемые крицы представляли собой комья сварившихся между собой зерен металла. Окончательная сварка зерен проходила при последующих нагревах и обработке металла давлением. Поэтому продукты кричного и пудлингового процессов в технической литературе часто объединяют одним термином — «сварочное железо».

Получение жидкой (литой) стали

Наиболее древним из всех существующих способов получения стали в жидком, расплавленном виде, т. е. так называемой литой стали, является тигельный процесс. Точная дата появления этого способа теряется в глубокой древности. Считают, что секрет технологии тигельной плавки был утерян в средние века. В Западной Европе этот способ возродили в конце первой половины XVIII в. В 1740 году англичанину Б. Гентсману (Benjamin Huntsman) удалось осуществить процесс переплава кусков сварочного железа в изготовленных им тиглях и получить литейную сталь. Добавляя в шихту разное количество чугуна, графита или мягкого железа, он регулировал твердость выплавляемой стали. Основная идея Б. Гентсмана — расплавить металл и заставить все шлаковые частицы всплыть, а затем этот шлак удалить. Сталелитейная фабрика Гентсмана (близ Шеффилда) строго хранила секреты производства, и англичане долго славилась как лучшие производители изделий из стали: ножей, хирургических инструментов и т. п.

Выплавка стали в тиглях производилась следующим образом: в тигли (емкостью обычно 25–35 кг) загружали металлическую шихту, по составу близкую к стали, которую планировали получить. Шихтовые материалы должны содержать минимальное количество вредных примесей, так как сера и фосфор при тигельном процессе практически не удаляются. Закрытые крышками тигли помещают в горны или пламенные регенеративные печи (передача тепла металлу осуществляется, таким образом, через стенки тигля). После расплавления шихты идут реакции окисления углерода, марганца, кремния (за счет имеющихся в шихтовых материалах оксидов железа), а также процессы шлакообразования.

Шлаки тигельного процесса имеют кислый характер, и основными их составляющими являются силикаты железа и марганца. Шлак образуется за счет продуктов реакций окисления, всплывающих в форме неметаллических включений, случайно попавших в тигель вместе с шихтой загрязнений, а также за счет материала тигля. В результате развития процессов восстановления концентрация оксидов железа в тигельных шлаках очень низкая. Тигельная сталь отличается исключительно высокими механическими свойствами как в продольном, так и в поперечном направлении прокатки иликовки.

Отсутствие окислительной атмосферы и раскисляющее действие материала тигля, а также сравнительно невысокие температуры процесса, т. е. работа без перегрева металла, — все эти особенности обеспечивают получение плотной стали с ничтожным количеством неметаллических включений и низким содержанием газов.

Массовое производство литого металла

Все перечисленные выше способы производства стали малопроизводительны. Бурное развитие промышленности и железнодорожного транспорта в середине XIX в. сдерживалось отсутствием высокопроизводительных и дешевых способов производства стали. Ответом на эти требования жизни явились разработка и широкое распространение двух новых способов производства: конвертерного и мартеновского.

Простой и дешевый способ получения литой стали в больших количествах путем продувки жидкого чугуна воздухом был предложен в 1855 г. английским механиком Генри Бессемером. (Sir Henry Bessemer). Продувку чугуна вели в специальном агрегате — конвертере с кислой футеровкой. Способ получил название конвертерного (бессемеровского).

Г. Бессемеру удалось предложить простую и удобную форму агрегата. За прошедшие полтора столетия сам процесс плавки существенно изменился, но конструкция агрегата осталась в принципе без изменения.

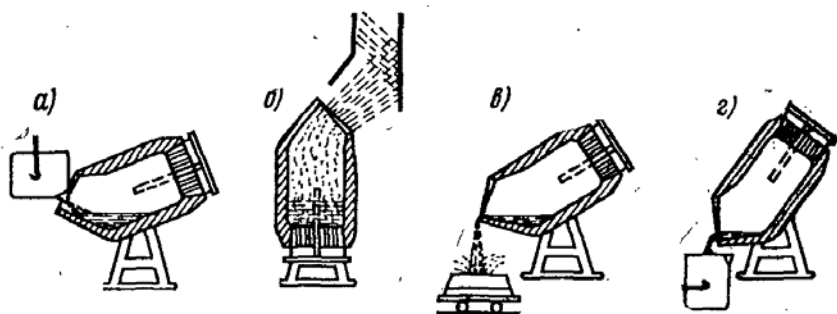


Рис 1.4. Работа конвертера: *а* — наполнение, *б* — продувка, *в* — выпуск шлака, *г* — выпуск стали

В 1878–1879 гг. англичанином Томасом (Sidney Gilchrist Thomas) был разработан вариант конвертерного процесса, при котором футеровку конвертера выполняли из доломита — материала, обладающего основными свойствами. Этот процесс получил название *томасовского* или «основного конвертерного», или «основного бессемеровского». В томасовском конвертере можно было наводить основной шлак.



Рис 1.5. Бессемеровский конвертер в музее завода, Шеффилд, Великобритания

В бессемеровском и томасовском процессах продувку жидкого чугуна в конвертере осуществляли воздухом. Выделяемого при этом тепла экзотермических реакций хватало только на нагрев залитого в конвертер металла (температура заливаемого в конвертер чугуна

1200–1300°C; температура получаемой стали должна быть около 1600°C). Возможностей переплава в конвертерах с воздушным дутьем шихты, в состав которой входил бы металлический лом, не было.

В 1865 г. во Франции Пьер-Эмиль Мартен (Pierre-Émile Martin) успешно осуществил выплавку стали из чугуна и железного лома в *регенеративных пламенных печах*. Получение в пламенных печах высокой температуры, достаточной для расплавления твердой шихты и получения стали, стало возможным благодаря подаче в печь подогретых газа и воздуха. Принцип использования тепла отходящих газов для подогрева топлива и воздуха в регенераторах промышленных печей впервые был реализован в 1856 г. братьями Сименсами (Carl Wilhelm Siemens, Ernst Werner Siemens), инженерами немецкого происхождения. Поэтому в ряде стран (прежде всего в Германии, а до революции 1917 г. — и в России) процесс называли «сименс-мартеновским».

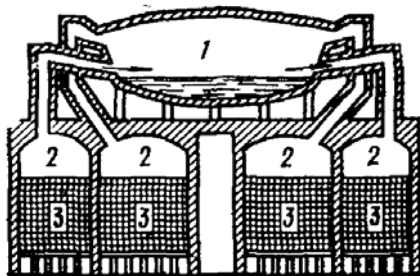


Рис. 1.6. Мартеновская печь: 1 — ванна, 2 — горячий воздух, 3 — регенераторы

Конвертерный и мартеновский способы явились базой, обеспечившей бурный рост индустриальной мощи промышленно развитых стран: менее чем за 100 лет мировое производство стали выросло более чем в тысячу раз (с 330 тыс. т в 1868 г. до 346 млн. т в 1960 г.).

Доменное производство

Печи, в которых можно было получить как железо, так и чугун, стали называть *блауофенами* (в России — *домницами*). Главным недостатком конструкции старых горнов была необходимость выламывать стенку печи для извлечения крицы, с последующим ремонтом. Увеличение объемов производства сделало этот недостаток критичным, и его побороли, устроив в стенке печи «передний горн». Такая конструкция позволяла доставать крицу без разрушения кладки.

В боковой стене печи делалось отверстие с огнеупорным кирпичным барьером. Отверстие засыпалось шлаком и закрывалось крыш-

кой. В барьере имелся канал для выпуска расплавленного чугуна и шлака (т. к. чугун тяжелее, то сперва вытекал он, а потом шлак). Крица, как мы знаем, не расплавлялась. Поэтому никуда и не вытекала.

Чугун выпускали 2-3 раза в сутки, пробивая забитое шлаком отверстие при помощи лома. Когда приходило время вынимать крицу, открывали крышку, разбивая кувалдой спекшийся шлак. И вот она — можно доставать.

Дальнейшее совершенствование металлургических агрегатов привело к появлению доменной печи (рис. 1.7). Главное отличие доменной печи состоит в том, что при любых параметрах процесса на выходе получается только чугун. В старых горнах при любых условиях плавки получалась только железная крица, а в блауофенах получали как крицу, так и чугун.

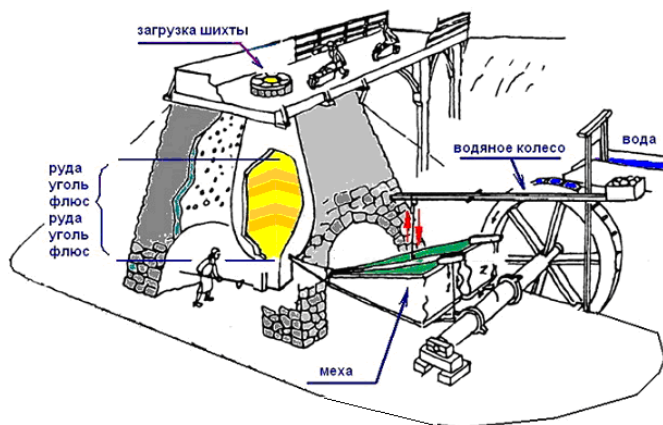


Рис. 1.7. Доменная печь XVI века

Развитие и усовершенствование доменных печей шло, прежде всего, по линии увеличения количества фурм, что, при достаточной мощности воздуходувок, значительно повысило производительность печи. Далее идет усовершенствование конструкции печи применением более тонких и легких стен, введением охлаждения, спуск шлака отдельно от чугуна. Увеличивается постепенно и объем печей. В 1829 впервые было применено нагретое дутье на шотландском заводе Кальдер. В 1856 году Каупером (Edward Alfred Cowper) был сконструирован аппарат, получивший его имя и дошедший до наших дней. Аппарат с насадкой из огнеупорного кирпича, то обогреваемой продуктами горения доменного газа то нагревающей воздух. Применение горячего дутья позволило значительно интенсифицировать доменный

процесс, увеличить производительность печи и уменьшить расход топлива.

В дальнейшем и до наших дней технология доменного процесса остается в сущности неизменной, и развитие доменного дела идет за счет конструктивного улучшения и укрупнения агрегатов и механизации их обслуживания.

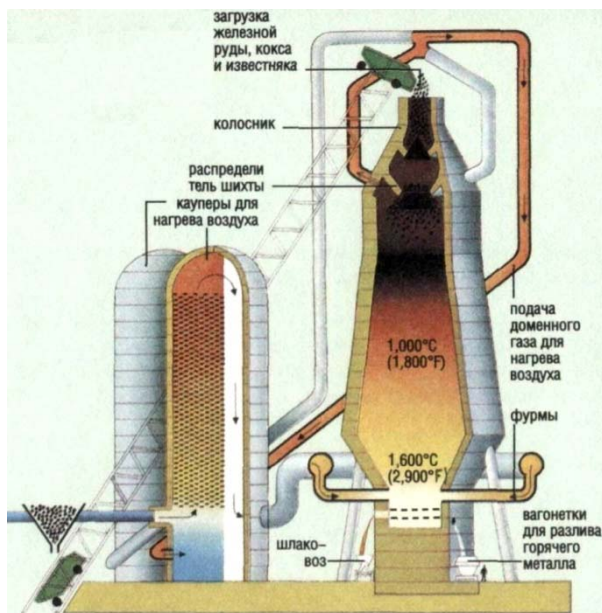


Рис. 1.8. Современная доменная печь

Чугунное литье

Англия начала свой подъем над европейскими странами в период правления Генриха VIII, правившего с 1509 по 1547 гг. Ввиду надвигавшегося военного конфликта с Испанией король принял военную программу, которая оказалась чрезвычайно важной для развития техники и, прежде всего, металлургии и судостроения. Одной из важнейших «военных программ» Генриха VIII было развитие артиллерии, а одной из составных частей этой программы – повышение качества и удешевление производства артиллерийских орудий. В 1541 г. перед королевскими литейщиками была поставлена конкретная задача: разработка технологии отливки пушечных стволов из чугуна. Кстати, спустя немногим более 300 лет аналогичная задача, но уже в отношении стального литья, была поставлена французским императором Наполеоном III перед выдающимся изобретателем Генри Бессемером. В 50-е гг. XIX в. это привело к революции в сталеплавиль-

ном производстве, в 40-е гг. XVI в. была совершена революция чугунного литья.

Руководителем программы стал мастер-литейщик Питер Боуде (Peter Baude), приглашённый Генрихом VIII из Франции. В результате напряжённых двухлетних экспериментов в королевской литейной мастерской в городе Бакстедде графства Суссекс удалось получить чугунное орудие полностью удовлетворяющее требованиям артиллерийской техники. Разработанная технология оказалась настолько успешной, что в 1546 г. только в королевском арсенале в Тауэре находилось уже 351 чугунное орудие. Артиллерия Генриха VIII поражала его современников.

Следующим массовым изделием, которое изготавливалось с помощью чугунного литья, появилось лишь в XVIII веке, это были железнодорожные рельсы.

Прокатка

Молот, неизбежно применявшийся для уплотнения кричного металла — сначала ручной, потом приводной от водяного колеса, — долгое время был единственным орудием горячей обработки металла; под молотом проковывались и листы. Проволочно-протяжный стан появился в Аугсбурге в 1351 г., а к 15 веку относится появление прокатки листов мягких металлов между валками.

Считается, что первый прокатный стан (с деревянными валками) был сконструирован еще Леонардо да Винчи. Первые прокатные станы для производства полосового железа были изготовлены лишь в XVIII веке, когда в Англии появились станы для проката тонкого листового (1769), затем круглого, квадратного и полосового железа. Они приводились во вращение от водяных колес. Паровой привод для прокатного стана был впервые применен в 1784 г. в Англии.

С развитием железнодорожного транспорта значительно увеличилась потребность в прокатной продукции. Первые рельсы были чугунными, однако в начале XIX века в Англии перешли на производство железных рельсов. В 1828 году появился первый прокатный стан для прокатки рельсов из пудлингового железа, а с 1825 года начали прокатывать рельсы из бессемеровской стали. Рельсы были главным продуктом прокатного производства.

Изобретение проката железа значительно облегчило применение его в конструкциях. Однако профили проката давали малоэкономичные сечения стержней, вызывавшие излишние затраты металла. Особенно невыгодно было применение круглого, квадратного или полосового железа в сжатых стержнях ферм. А между тем бурное развитие машиностроения, судостроения, а затем железнодорожного транспор-

та предъявляли металлургической промышленности новые требования на увеличение выплавки железа, повышение его качества и увеличение ассортимента проката. В связи с этим производились дальнейшие исследования в области изыскания более рационального распределения металла по сечению, что привело к созданию станов для проката углового, таврового и зетового железа (Англия — 1819-1820), рельсов (Англия — 1832) и, наконец, двутавров и швеллеров (Франция — 1849).



Рис. 1.9. Современный листопрокатный стан

Помимо рельсов для развития флота требовалась броня. Первый броневой прокатный стан был сконструирован в 1859 году русским механиком В.С. Пятовым. Все эти станы были довольно примитивными: валки станов приводились во вращение от водяного колеса, а позднее — паровой машины. Перемещение горячего металла к стану и от него осуществлялось вручную. Труд прокатчика был самым тяжелым на заводе.

Применение железа и его сплавов в строительстве

Строительные металлоконструкции связаны с тремя видами железоуглеродистых сплавов (черных металлов) — это чугун, сварочное железо и стали.

Чугун — это сплав железа с относительно большим количеством углерода — от 2 до 4.5 %. Свойства чугуна зависят от примесей и способа охлаждения отливок. У чугуна в явном виде отсутствуют

предел упругости и удлинение при разрыве. Все сорта чугуна отличаются хрупкостью. Разрушение происходит без видимых деформаций. Нет линейной зависимости деформаций от напряжений. Остаточные деформации появляются даже при малых напряжениях. Средний модуль деформации около 100 000 МПа, т.е. вдвое меньше чем у стали. Временное сопротивление чугуна сжатию, растяжению и изгибу различно, вследствие чего чугун пригоден только для сжатых частей. В XIX веке были достигнуты следующие временные сопротивления: при сжатии = 290–980 МПа; при растяжении = 70–300 МПа; при изгибе = 100–350 МПа. Внутренние напряжения при остывании отливок могут привести к разрушению отливки даже при слабом ударе. Внутри чугунной отливки часто образуются пустоты.

Сварочное железо — неоднородный волокнистый материал — научились получать в середине XIX века из чугуна. Чугун варили, перемешивая в течение 2-х и более часов, удаляя таким образом графит из расплава. Масса перемешивалась со шлаком и изливалась, остывала с его включениями. Этот пористый материал называли крицей. Далее крицу разогревали и проковывали под паровым молотом, уплотняя и сваривая проковкой отдельные куски железа между собой (отсюда название «сварочное железо»). Затем прокатывали на вальцах. Уплотненные остатки шлаков внутри железа приобретали вид нитей-строчек, сообщая сварочному железу волокнистую структуру и неоднородность свойств вдоль и поперек прокатки. Механические характеристики сварочного железа были следующими: временное сопротивление вдоль волокон = 230–490 МПа; поперек = 180–390 МПа; предел упругости вдоль волокон 130–230 МПа; удлинение при разрыве вдоль волокон 30–10 %; поперек — 6–2 %.

Стали. С изобретением конвертора и мартена начали производить стали, которые имели равномерную мелкозернистую структуру. Выплавленную сталь разливают в слитки (отсюда название «литое железо»). Механические свойства сталей в начале XIX века были близки по своим свойствам к современным углеродистым сталям.

Все дальнейшее развитие сталеплавильного производства было связано не только со стремлением к интенсификации и удешевлению производства, но с совершенствованием структуры и химического состава стали для придания ей требуемых служебных свойств (увеличение прочности, обеспечение вязкости, свариваемости и т. п.).

* * *

При анализе развития конструкций за последние 250 лет удобно классифицировать их применительно к периоду, когда каждый из

этих трех черных металлов был доминирующим. Неизбежно, эти периоды накладываются, и существенно, что в каждом случае потребовалось достаточно длительное время для того, чтобы тот или иной вариант материала стал широко распространенным. Периоды захватывают следующие временные интервалы:

- чугуны — 1780–1850 гг. (колонны до 1900 г.)
- сварочное железо — 1850–1900 гг.
- сталь — с 1890 г. и до настоящего времени.

Эти даты приблизительны и отличаются для разных стран, например, они хорошо подходят к Англии или к России, где в первой половине XIX столетия металлургическая промышленность была более развита, чем в других странах, в то время как во Франции не было никакого реального периода чугуна, а в Америке и чугуны и сварочное железо сравнительно мало использовались до середины XIX столетия, после чего последовал бурный рост их применения. С другой стороны, сталь стала популярной примерно в одно и то же время в Европе и Америке.

Постепенность переходов иллюстрирует общая хронологическая схема, показанная на рис. 1.10. Лишь немногие новации, связанные с переходом к новым технологиям, имеют на этой схеме четкую историческую границу.

Следует, однако, заметить, что металлические элементы использовались в конструкциях деревянных и каменных зданий древности, что не нашло своего отражения на рис. 1.10.

Так, например, греческие архитекторы иногда проектировали перемычки U-образной формы, укрепляя их железными стержнями [36]. В одном случае железный стержень с размерами примерно 7×12×180 см был установлен в вершину перемычки, полость в которой была опущена немного ниже железного стержня, и это позволило передать приложенную в центре нагрузку ближе к краям мраморного бруса (рис. 1.11).

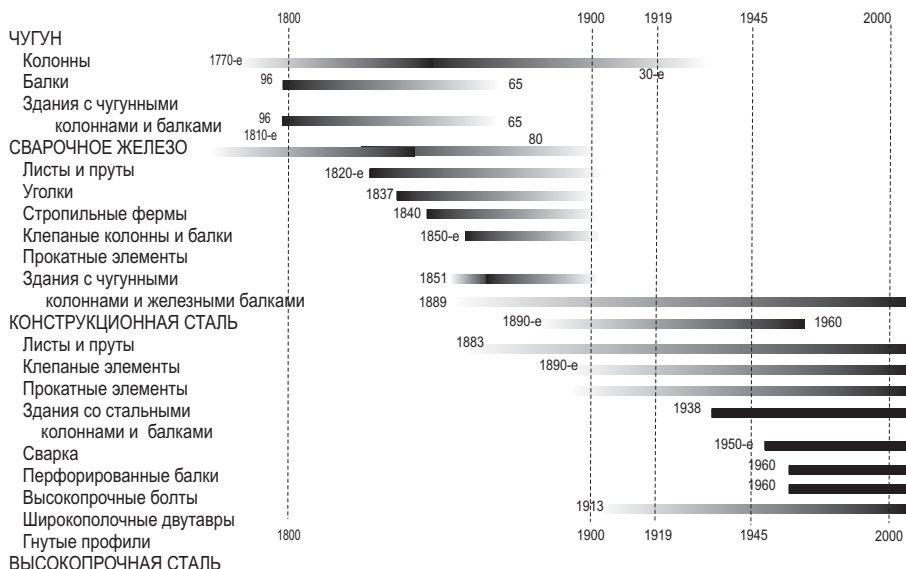


Рис. 1.10. Общая хронология

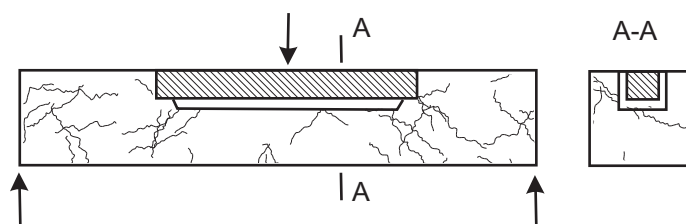


Рис. 1.11. Мраморная перемычка, усиленная железом

Уже в XII веке металл применялся в виде затяжек и скреп для каменной кладки из кирпичного железа. Одними из первых таких конструкций являются затяжки Успенского собора во Владимире (1158 г.).

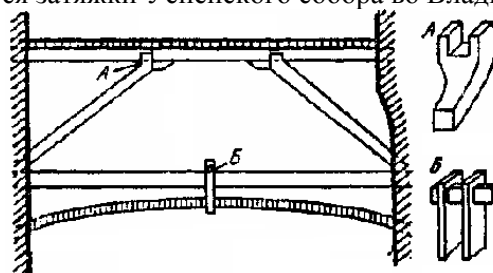


Рис. 1.12. Перекрытие коридора в Покровском соборе

Можно упомянуть Покровский собор в Москве – там затяжки, поддерживающие пол и потолок, укреплены для облегчения работы на изгиб подкосами (рис. 1.12). Так что, можно считать, что основы строительства простейших металлоконструкций лежат в глубокой древности. Но до создания настоящих металлических конструкций в современном понимании этого термина еще было очень далеко.

Способы соединения элементов

Соединения элементов металлических конструкций выполнялись в разное время разными способами. Схема применения различных способов соединения представлена на рис. 1.13.

Каждый из указанных на этой схеме способов претерпевал изменения, развивался, и в некоторых случаях отмирал, будучи вытесненным из практики применения своим соперником.

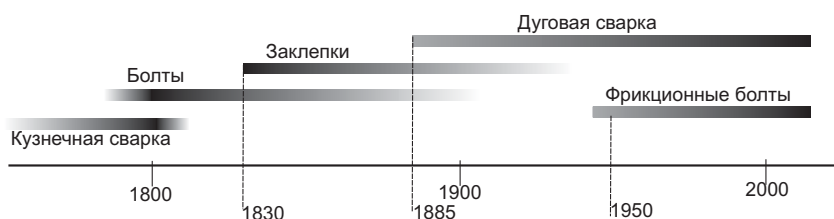


Рис. 1.13. Изменение способов соединения элементов

Кузнечная сварка. Прообраз болта

При помощи кузнечной (горновой) сварки соединялись между собой полосы металла из кричного железа, образуя уже достаточно длинные стержни-стяжки, которые применялись в каменных конструкциях.

Затяжки скрепляли через проушины на штырях или на «замках» как это показано на рис. 1.3. Стержни с головкой и прорезью для установки клинового фиксатора, которые использовались еще древнеримскими мастерами, можно считать прообразом современного болтового соединения.

Именно такого рода соединения использовались в первых чугунных мостах, чугунные элементы которых отливались на заводе, а затем собирались при помощи шпилек и болтов (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Соединения чугунных элементов моста

Болты

Специалисты по истории техники относят появление первых болтов, отдаленно напоминающих современные, где-то к середине XV века. На начальном этапе болты с резьбой использовались без гаек, и вкручивались в металл или дерево как шурупы или самонарезающие винты.

Сложности, возникавшие при ручной нарезке резьбы, заставили лучшие умы того времени придумывать механизмы для ускорения и упрощения этой работы. Первым устройством для нарезки резьбы, имеющим практическое применение, принято считать станок француз-а Жака Бессона (Jacques Besson), который изобрел его в 1568 году. И по данным исторических источников в конце XVI, начале XVII веков появились гайки, правда, изготавливались они, так же, как и болты – вручную, что делало весьма сложной работой подбор соответствующей друг другу пары — болта и гайки.

Вопросами механизированной нарезки резьбы занимались многие механики, последовательно совершенствуя конструкцию токарного станка. Значительные успехи в этой сфере были достигнуты во второй половине XVIII века. А в 1778 году британским механиком Д. Рамедоном (D. Ramedon) были разработаны станки для нарезания резьбы. У станка резец передвигался вдоль вращающейся заготовки, причем скорость его перемещения зависела от скорости вращения эталонного винта. Для изменения шага резьбы токарь должен был менять шестерни. В 1795 г. во Франции был изготовлен один из первых образцов станков, предназначенных исключительно для нарезки резьбы.

До середины XIX века нарезка резьбы на винторезных станках была единственной технологией изготовления болтов и гаек. Но в это время американец У. Уорд (William Ward) предложил использовать в этих целях горячую ковку. Для этого прутки, имеющие диаметр болта, нагревается до 870°C и пропускается через специальные плашки, которые выдавливают резьбу на боковых поверхностях заготовки.

С конца XIX века и до настоящего времени массовый выпуск болтов и гаек производится преимущественно с использованием холодным методом непрерывного формообразования. В качестве исходного

материала используется проволока или прутки, из которых сначала вырезается стержень необходимой длины, а далее при помощи ряда штампов формируется головка, делаются фаски, а затем на полученную заготовку накатывается резьба.

Заклепки

Использование заклепки в качестве крепежного приспособления известно с незапамятных времен. В древней Греции заклепка служила для соединения бронзовых частей на доспехах. С конца XVIII века заклепки использовали для создания металлических конструкций судов, мостов и других промышленных объектов.

Заклепочные соединения образуют постановкой заклепок в совмещенные отверстия (просверленные или продавленные¹) соединяемых элементов и расклепкой с осаживанием стержня. При горячей клепке остывающие заклепки стягивают детали, в результате чего часть, а иногда и вся внешняя продольная нагрузка на соединение передается силами трения на поверхности стыка.

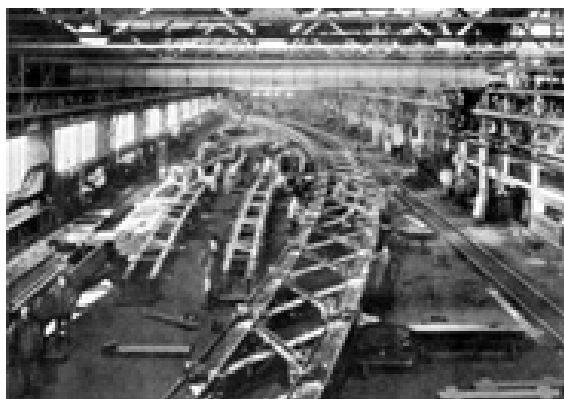


Рис. 1.16. Арка моста через Рейн на заводе Gustavsburg Works

Использование клепки, требовавшей специального оборудования и квалифицированных исполнителей, способствовало переносу изготовления металлических конструкций в заводские условия (рис. 1.16).

¹ При продавливании отверстий металл вокруг отверстия меняет свою кристаллическую структуру и делается хрупким вследствие наклепа. В Австрии в 1889 году был поставлен эксперимент по сопоставлению влияния пробитых и просверленных отверстий на несущую способность конструкций. Для этого были изготовлены одинаковые фермы с узлами на заклепках. Разрушение ферм с пробитыми отверстиями наступило при напряжениях в 2800 кг/см^2 , в то время как фермы с просверленными отверстиями выдержали 3300 кг/см^2 .

Особенно сложной была клепка на монтаже. Вот как описывает этот процесс в одной популярной публикации «...на помосте из досок, или просто на стальных балках стоит угольная печь. В угольной печи "повар" "варит" заклепки – небольшими мехами гонит в печь воздух, чтобы разогреть их до нужной температуры. Заклепка прогрелась, теперь ее нужно передать туда, где она будет устанавливаться, и чаще всего это можно сделать единственным способом – бросить. "Повар" поворачивается к "вратарю" и щипцами бросает раскаленную докрасна болванку в его сторону. "Вратарь" стоит рядом с местом клепки, его цель – поймать летящую железку обычной жестяной консервной банкой. "Вратарь", поймав заклепку, загоняет ее в отверстие. "Упор" с внешней стороны соединения удерживает шляпку заклепки. "Стрелок" пневматическим молотом расклепывает ее с другой стороны».



Рис. 1.17. Бригада клепальщиков: слева направо — «повар», «вратарь», «упор» и «стрелок»

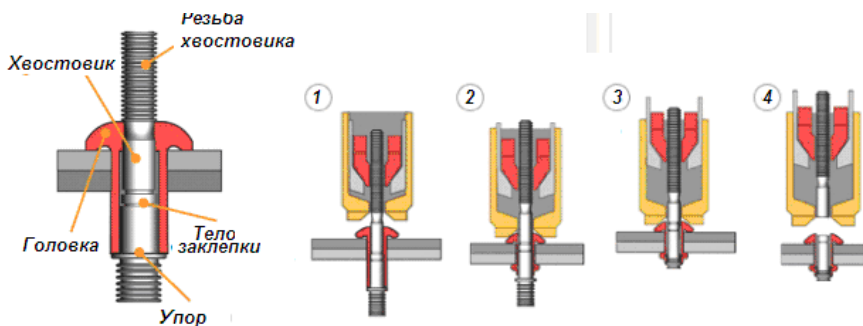


Рис. 1.18. ПОП заклепка и ее установка: 1 – размещение заклепки и установка гайковерта, 2 – натяжение заклепки со снятием трубчатой части, 3 – конец формирования головки, 4 – отрыв отсоединяемой части и завершение монтажа

Сама конструкция заклепки, технология ее установки мало менялись за годы их использования. Казалось, что переход к сварке практически уничтожил эту технологию, но в 50-е годы началось бурное ис-

пользование односторонних вытяжных заклепок, так называемых ПОП-заклепок. Ее активно используют для крепления тонких листов, например, при создании вентилируемых фасадов или при монтаже профилированного настила.

Сварка

Изначально в дуговой сварке не использовали расходных сварочных материалов, и основным видом электросварки была сварка дугой с использованием неплавящегося угольного электрода. Впервые она была применена в 1881 году Августом де Меританом (Auguste de Méritens), в 1882 году ее модернизировал Н.Н. Бенардос. Спустя короткое время, в 1888 году Н. Г. Славянов заменил уголь на голый металлический электрод (пруток), обычно изготавливавшийся из холоднокатаной стали. Тем самым было положено начало дуговой сварке плавящимся электродом. Дугу от такого электрода было очень трудно зажигать и поддерживать, так как она горела на открытом воздухе, и поэтому наплавленный металл был сильно загрязнен и вспенен кислородом и азотом.

Основной прогресс был достигнут (приблизительно в 1902 году), когда Кельберг (Oscar Kjellberg) изготовил флюс для голых электродов. Хотя по современным стандартам предложенное им флюсование электрода считается сырым, с тонкой, низкокачественной обмазкой, оно давало некоторую газовую защиту при сварке и в какой-то степени обеспечивало стабилизацию дуги.

На рубеже XIX и XX вв. произошло снижение интереса к сварке поскольку со стороны производства еще не было достаточных запросов на новый метод соединений элементов из металла; электротехническая промышленность не вырабатывала необходимых электромашин и трансформаторов; мощность электростанций была недостаточна для отпуска большого количества электроэнергии на технические цели и, наконец, оборудование для клепки не было еще амортизировано.

В годы первой мировой войны электросварка получила большое распространение в США на работах по восстановлению немецкого трофейного флота, выведенного из строя экипажами немецких судов. Эти работы показали простоту, быстроту и экономическую целесообразность применения электросварки для соединения металлических элементов.

В 1912 году появилось толстое электродное покрытие, по существу, представляющее собой обертку из синего асбеста, пропитанного жидким стеклом. Преимущество толстого покрытия заключалось в

существенных добавках других составляющих, чего не было в тонком покрытии.

С внедрением в технику дуговой сварки толстопокрытых электродов появились новые способы дуговой сварки, в это же время были разработаны машины для контактной сварки, после чего на многих производствах газовая сварка постепенно начала вытесняться электрической сваркой. С увеличением использования электрической и вытеснением газовой сварки увеличилось использование кислородной резки.

К концу 1930-х годов в США и СССР был разработан способ сварки под флюсом, при котором дуга и расплавленный металл защищены оболочкой из расплавленного флюса и слоем нерасплавленных частиц гранулированного флюса. Непрерывная сварка электродом под флюсовым покрытием осуществлялась при помощи сварочной головки с автоматической подачей прутка.

В 1948 году был разработан процесс с применением защитного газа – дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа. В данном процессе электрод имел форму проволоки, которая подавалась из бухты в дугу со скоростью, равной скорости плавления проволоки. Так как применение аргона для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа экономически невыгодно, то после нескольких лет исследований в СССР, Великобритании, Нидерландах и Японии к концу 1950-х годов были разработаны методы, сделавшие возможным использование в качестве защитного газа углекислый газ.

Высокопрочные болты

Фрикционные или сдвигоустойчивые соединения – это соединения, в которых внешние усилия воспринимаются вследствие сопротивления сил трения, возникающих по контактными плоскостями соединяемых элементов от предварительного натяжения болтов. Натяжение болта должно быть максимально большим, что достигается упрочнением стали, из которой они изготавливаются, путем термической обработки. Применение высокопрочных болтов в фрикционных соединениях существенно снизило трудоемкость монтажных соединений.

Впервые высокопрочные болты в монтажных соединениях были применены в США в 30-х годах XX столетия. Ими заменяли временные монтажные болты и пришедшие в расстройство заклепки.

Вторая мировая война задержала дальнейшие исследования и затормозила применение этого соединения. В 1945 г. в Северо-

Западном университете США снова были исследованы болтовые соединения с учетом сил трения, развивающихся между деталями.

С 1947 г. в Иллинойском, Вашингтонском и Северо-Западном университетах исследования соединений на высокопрочных болтах проводились систематически по общему координационному плану. Была проведена не одна тысяча испытаний, послуживших основанием к тому, что высокопрочные болты прочно вошли в строительную практику США. В 1946 г. в штате Огайо был построен и открыт для движения первый железнодорожный мост с монтажными соединениями на высокопрочных болтах.

В Европе соединения металлических конструкций на высокопрочных болтах впервые были применены в Англии и ФРГ. К этому времени в США уже был накоплен достаточный опыт по применению соединений на высокопрочных болтах (для каркасов зданий, железнодорожных и автодорожных мостов, промышленных сооружений различного назначения, спортивных сооружений, выставочных павильонов и т. д.).

В 1955–1956 гг. стальные конструкции с соединениями на высокопрочных болтах появились во Франции, Италии, Австрии, Швейцарии и других странах. Первоначально строительство таких сооружений в Европе базировалось на американском опыте, затем в Англии и ФРГ были созданы свои технические условия на изготовление и приемку высокопрочных болтов и на проектирование и монтаж конструкций с их применением.

В 1954 г. в ФРГ было построено пролетное строение моста через р. Рур пролетом 46 м с монтажными соединениями на высокопрочных болтах, а в 1956 г. вышли в свет временные нормы для расчета и конструирования соединений на высокопрочных болтах.

Одной из основных проблем явилось обеспечение величины требуемого натяжения. Используется контроль натяжения по моменту закручивания или по углу поворота гайки, но наиболее надежным является использование анкерно-натяжного болта (Huck-Fit bolt), где гарантированная величина натяжения определяется разрывным усилием.

Последовательность установки (монтажа) демонстрирует рис. 1.19:

1. Зажимной болт вставляется в отверстие. Обжимное кольцо надевается на болт фаской в сторону инструмента.

2. Насадка инструмента надевается на хвостовик болта. Инструмент приводится в действие. Происходит захват и вытягивание хвостовика.

вика. Головка болта прижимает материал. Насадка прижимает кольцо во встречном направлении.

3. Насадка опрессовывает кольцо. Материал кольца вдавливается в фиксирующие канавки болта. Болт натягивается, и увеличивается сжатие между соединяемыми деталями.

3. Хвостовик отрывается. Привод инструмента отпускается. Насадка освобождается.

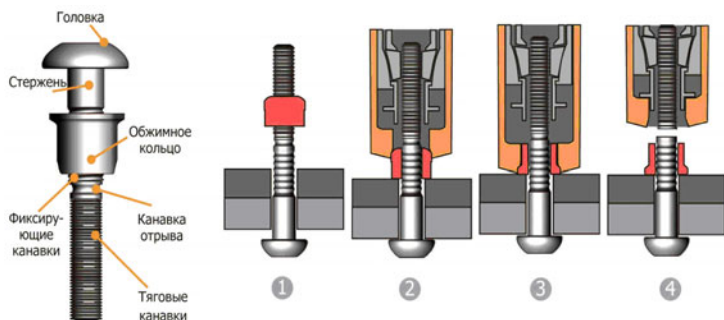


Рис. 1.19. Установка анкерно-натяжного болта

Технология, основанная на отрыве натяжной части болта, во многом напоминает технологию установки трубчатых ПОП-заклепок. Только в первом случае отрыв хвостовика гарантирует заданное натяжение болта, а во втором случае отрыв происходит при завершении формирования головки заклепки из сминаемой части трубки. В настоящее время эти технологии совершенствуются (уже сейчас существуют их разновидности), и постепенно вытесняются классические методы.

Очерк второй. КОНСТРУКТИВНАЯ ФОРМА НОМЕР ОДИН

*...иногда в этом деле полный туман.
Например, мы не знаем имени гения,
Который изобрел ... карман.
Карман нам буквально как воздух полезен,
Он прочно вошел в нашу жизнь, в наш быт.
Мы в него лишь только за словом не лезем,
А изобретатель его забыт.*

В.Ардов. Размышления об изобретениях

Форма двутавра для металлических конструкций является своеобразным символом, этот символ присутствует во многих эмблемах фирм, занимающихся проектированием, изготовлением и монтажом стальных конструкций. Однако, на вопрос: «Кто и когда изобрел двутавр?» профессионалы-металлисты чаще всего отвечают пожатием плеч.

Изложение удивительной истории двутавра затрудняется тем, что многие идеи здесь возникали независимо у исследователей, конструкторов и технологов, зачастую без взаимного обмена сведениями. Работы ученых не использовались практическими инженерами, которые развивали конструктивные решения, инженеры полагались на свою интуицию и эксперименты, а металлурги развивали свои возможности под влиянием других обстоятельств. Становление специфической формы двутаврового сечения приходится проследить через ее развитие в рельсах железной дороги, в первых шагах железного судостроения, и лишь в последнюю очередь, в создании балочных элементов строительного предназначения. При этом начальный этап истории демонстрировал преобладающее влияние эксперимента и практики, а не шел от осознанного использования научных идей. Лишь примерно через семьдесят лет положение кардинально изменилось, и теоретический анализ возглавил процесс совершенствования конструктивной формы.

Эмпирики

Рельсы

Развитие формы двутавра началось в поиске профиля рельса. Первый рельс, который имел форму, в какой-то степени похожую на двутавр, был чугунным рельсом приблизительно в 1 метр длиной (рис. 2.1), запатентованный Джессопом (Jessop) в Англии в 1789 г. Он опирался на дискретно расположенные столбчатые опоры из камня, для чего у его концов была предусмотрена плоская подошва (рис. 2.1, сечение В-В).

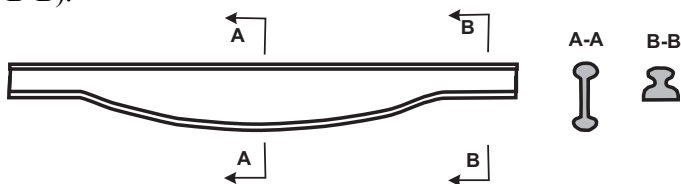


Рис. 2.1. Чугунный рельс Джессопа (1798 г.)

Такое решение просуществовало более 20 лет, пока для рельсов не начали использовать сварочное железо. Только в 1820 году металлургии смогли прокатать рельс таврового типа (рис. 2.2,а). Джон Биркеншоу (Birkenshaw), британский инженер, получил патент для этого рельса из кованого железа, у которого были немного выпуклая голова и вертикальная стенка. Рельс Кларенса (Clarenc), показанный на рис. 2.2,б, появился в 1830 году, и у него появилось дополнение в форме головки у основания стенки.

Заключительным шагом к двутавровой форме в сварочном железе было созданием американского профиля рельса Робертом Стевенсом (Stevens). В 1830 г. Стевенса послали в Англию, чтобы купить рельсы и локомотив. Во время этой поездки он задумывал идею плоской подошвы рельса, опирающегося на шпальное основание (рис. 2.2,с) и, таким образом, появился, так называемый, американский рельс. Его прокатка началась в 1831 году.

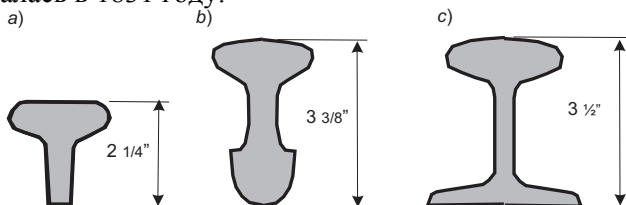


Рис. 2.2. Прокатные рельсы: а – Биркеншоу (1820 г.); б – Кларенса (1830 г); с – Стевенса (1831 г)

Суда

Первое полностью железное судно было построено в 1818 в Шотландии плотником и двумя кузнецами, шпангоуты ковались в угловую форму из плоского листа на специальной наковальне (рис. 2.3,а). Для увеличения мощности шпангоутов их форма развилась от простого уголка до более сложных сечений, как это показано на рис. 2.3. Во-первых, обратная структура была развита (рис. 2.3,б), была использована комбинация двух уголков, приклепываемых друг к другу для формирования Z-образного профиля. Позже Z-образные профили начали изготавливать кузнечным способом (рис. 2.3,с), как и швеллерные сечения (рис. 2.3,д). Последняя секция была изменена и появился углобульб (рис. 2.3,е), используемый до сегодняшнего дня. Все эти профили деталей корпуса судна были трудно изготавливать, и практикам металлопрокатного производства потребовалась более чем четверть века для совершенствования методов их прокатки.

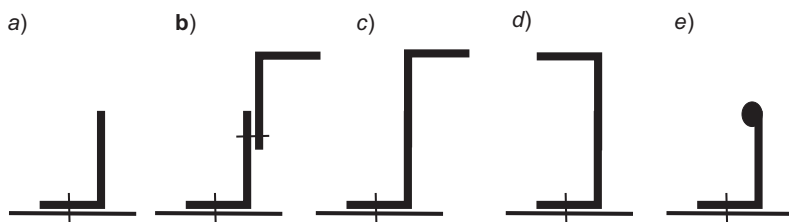


Рис. 2.3. Шпангоуты железных судов

Где-то между 1800 и 1819 гг. металлопрокатный завод во Франции произвел первые прокатные уголки из сварочного железа, и в 1830 году уголки были все еще единственными прокатываемыми профилями. Между 1828 и 1830 гг. сначала катили тавр. Этот профиль был весьма маленьким в поперечном сечении, и практически не нашел применения в строительстве. Когда в 1847 году был предложен тавр высотой 4 дюйма, французские заводы отказались его катать.

Главные события десятилетия 1830-ых были связаны со строительством железных судов. Уильям Фэйрбэйрн (Fairbairn) из Манчестера был британским инженером, эксперименты которого, начатые в 1838 году, позволили существенно продвинуть знание несущей способности пластин из сварочного железа и других конструкций железных судов [39]. Он был совладельцем верфи, которая строила полностью железные суда, десятилетием позже пионерные исследования Фэйрбэйрна при проектировании мостов установили возможность использования железа вместо чугуна для строительства знаменитых трубчатых мостов «Британии» и «Конвей».

При испытаниях новых форм шпангоутов Фэйрбэйрн сначала использовали составной тавр (рис. 2.4,*a*), склепанный из двух уголков и пластины. Тогда ему представили цельный тавр с приблизительно теми же размерами (рис. 2.4,*b*) он нашел, что такой тавр был почти столь же прочным, как клепанные тавры. Однако, Фэйрбэйрн не был полностью удовлетворен сопротивлением этих профилей и справедливо полагал, что форма и пропорция частей с двумя полками приведет к сечению большего сопротивления (рис. 2.4,*c*). Это сечение было описано как балка из двух стержней, склепанных вместе, предполагалось, что эти стержни до склепки были согнуты вручную в швеллерные профили.

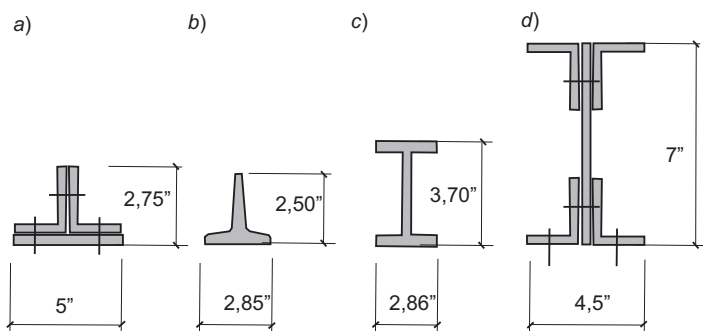


Рис. 2.4. Конструкции, исследованные Фэйрбэйрном

Фэйрбэйрн заключил, что конструкция "стержни с двойными поясами, сформированными из пластины и приклепанных уголков наверху и у основания" (рис. 2.4,*d*), т. е. двутавровая балка, является самой подходящей для поддержки палуб. Хотя его исследование было закончено в 1839 г., Фэйрбэйрн не издавал свои результаты до 1850 года и во многом упустил свой приоритет.

Междуэтажные перекрытия

Первый шаг в развитии конструктивной формы был связан с повышением огнестойкости сводчатых кирпичных перекрытий на текстильных фабриках Англии. Для поддержки сводов использовались деревянные балки с клиновидными накладками (рис. 2.5,*a*). Эта же конструктивная форма была использована, когда клиновидные уширения стали частью чугунной балки (рис. 2.5,*b*) в перекрытии текстильной фабрики Шрусбери, построенной в 1796-97 гг. Следующий шаг в развитии формы несущей балки был связан с использованием Т-образного сечения (рис. 2.5,*c*). Это изменение произошло, когда Джеймс Уатт (James Watt) построил Солфордский Завод в 1799-1801 гг. Позже на протяжении почти тридцати лет такое конструк-

тивное решение стало стандартным (рис.2.5.d). Эти конструкции не были разработаны в соответствии с теорией в современном смысле этого слова, скорее они развились на основе инженерной интуиции.

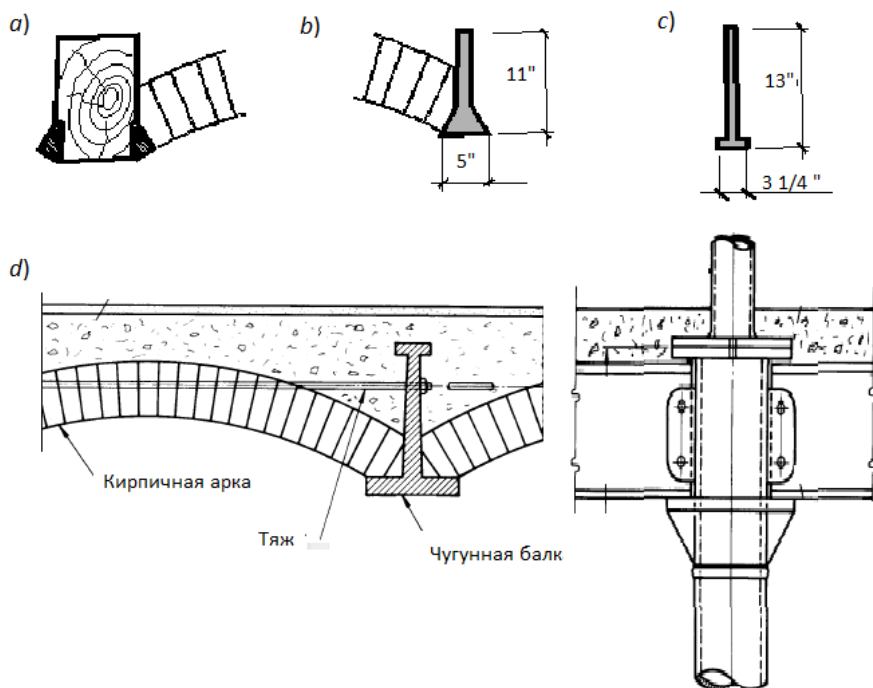


Рис. 2.5. Устройство сводчатых кирпичных перекрытий

Хотя перевернутый тавр был формой никогда прежде не рассматриваемой, формула для вычисления ее несущей способности была предложена британским инженером Чарльзом Бэге (Bage) уже 1803 году. Бэге использовал свою формулу, чтобы определить размеры балок для завода в Лидсе и позже проверил свою теорию полномасштабными экспериментами.

В 1845 году во время забастовки Парижских плотников Фердинанд Зоре (Zorès) высказал идею замены древесины двутавровыми балками из сварочного железа для использования в перекрытиях. Однако возможно, что Зоре начал свою работу над этим проектом несколько ранее. Зоре разрабатывал свой проект в то же самое время, что и парижский строительный подрядчик Чибо (Chibon). Идея Чибо состояла в том, чтобы взять пару тавров, уже доступных тогда как стандартные компоненты, добавить полосу листового железа и скле-

пать все это в двутавровую балку. Очевидно, оба автора не были убеждены в практических преимуществах этого проекта, поскольку они решили вместо этого остановиться на компактном профиле сварочного железа, который нужно будет катить, что сделало бы клепку излишней.

Развитие соответствующей техники прокатки заняло, однако, несколько лет, и только к 1849 году металлопрокатные заводы смогли поставлять двутавровые балки без серьезных дефицитов. В своей книге, изданной в 1853 году [52], Зоре рассказывает историю событий, которые привели к изобретению катанного двутавра из сварочного железа. Когда к концу 1848 Зоре добавил к катавшемуся тавру второй пояс, заводы отказались прокатывать этот профиль, пока не был размещен достаточно большой заказ, способный покрыть высокую стоимость нового оборудования. К тому времени, когда такой заказ (с помощью Зоре) был обеспечен, бельгийский изобретатель Альфонс Хальбо (Halbou) запатентовал новый метод производства фасонных профилей, основанный на прокатке стальной заготовки.

Зоре обеспечил заказ; он получил серебряную медаль на французской Национальной выставке 1849 года за внедрение двутавровых и швеллерных балок. Они скоро стали весьма успешными, по крайней мере, в Париже, где широко вошли в строительную практику. Здесь использовалась, так называемая, Парижская клетка (рис. 2.6), где вместо ранее использовавшихся деревянных брусьев были применены прокатные двутавры.

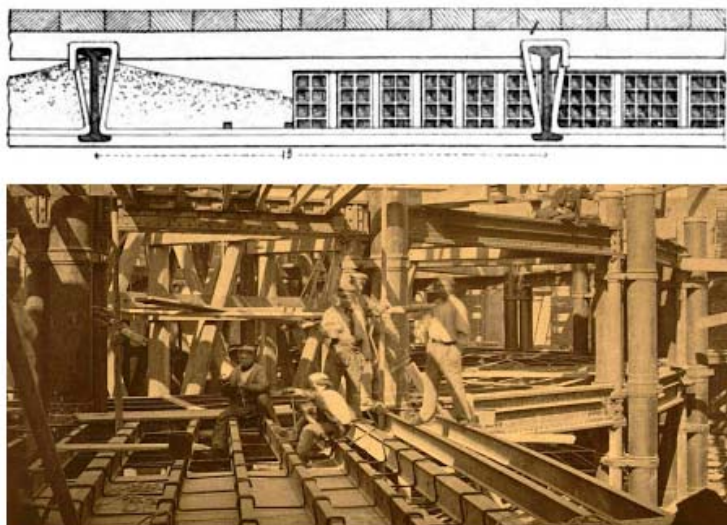


Рис. 2.6. Парижская клетка

Двутаавры Зоре улучшили эту конструкцию, делая ее пригодной для междуэтажных перекрытий большого пролета и под большую нагрузку. Максимальный пролет, который было возможно перекрыть такой конструкцией, составлял приблизительно восемь метров. Изобретение Фердинанда Зоре балки из сварочного железа, состоящей из одного двутаавра, оказало решающее влияние на конструкцию перекрытий, и в этом отношении должно быть признанным, как своего рода поворотный момент, хотя у этого предложения фактически было несколько предшественников. Использование металлических конструкций для устройства перекрытий (в основном чугунных стропильных систем) характерно и для России начала XIX века. Однако началось и применение железа, так в Санкт-Петербурге в 1838 году клепаная эллиптическая балка была использована для ремонта Зимнего Дворца после пожара 1837 года (рис. 2.7). Эллиптические балки состоят из двух вертикальных листов толщиной по 0,8 мм и двух листов такой же толщины, изогнутых по дуге окружности. Стенка балки и изогнутые листы посередине высоты через 45 см по длине балки соединены болтами с постановкой распорных трубочек из листового железа. Верхние и нижние кромки листов соединены при помощи уголков. Посередине пролета число листов в балке увеличивалось вдвое.

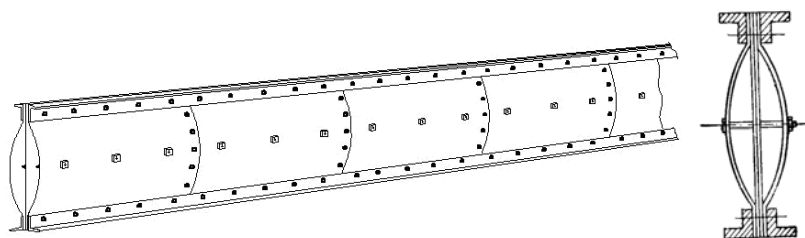


Рис. 2.7. Эллиптическая балка из Зимнего Дворца

Первое применение прокатных двутаавровых балок в стальном несущем каркасе гражданского здания зарегистрировано в 1884 году в США в строительной конструкции десятиэтажного «небоскрёба». Сегодня для нас это рутинная, но в конце XIX века инновационная для того времени технология стала настоящим революционным прорывом в сфере капитального строительства. Именно то 10-этажное здание стало прообразом множества известных на весь мир высотных построек. А стальная двутаавровая балка превратилась в неотъемлемый элемент не только любого небоскрёба, но и практически любого несущего каркаса.

Исследователи

Приблизительно в 1820 году во Франции Альфонс Дюло (Duleau), дипломированный специалист из Ecole Polytechnique проводил испытания на изгиб прямоугольных балок [26]. Тогда же он испытал серию составных балок из двух плоских параллельных стержней, соединенных распорными деталями (рис. 2.8). Дюло нашел, что несущая способность такой балки увеличилась с увеличением расстояния между стержнями и предложил использовать эти стержни как полки, соединяя их вертикальной стенкой. По-видимому, это было первое испытание конструкции из сварочного железа отличной от прямоугольного бруса.

К сожалению, это открытие оставалось лишь в пределах границ французской испытательной лаборатории, и находка Дюло переоткрывалась в кропотливых исследованиях других ученых. Идеи Дюло не были осознаны в течение еще практически 25 лет, пока исследования Фэйрбэйрна не открыли путь к строительству трубчатых мостов из сварочного железа.

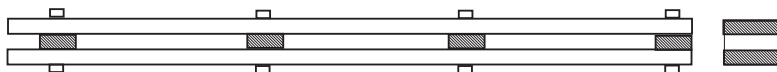


Рис. 2.8. Составной стержень

Двутаавровый брус практически был исследован в чугуна. В развитии этой конструктивной формы теоретическая работа предшествовала практическому применению; на основе теории брус был задуман сначала с равными полками, затем он был изменен, чтобы удовлетворить особенностям использованного материала. К 1824 году авторитетным специалистом по сопротивлению материалов был Томас Тредгольд (Thomas Tredgold) британский инженер и автор учебника [51]. В своей книге Тредгольд описал доводы, которые привели его к симметричному двутаавровому профилю как самой грузоподъемной форме поперечного сечения. Он предложил распределить большую часть его материала в максимально возможной степени далеко от нейтральной оси (сегодня мы бы сказали, что следует стремиться к идеальному двутаавру). После этих исследований Тредгольд продолжил строить такой брус из чугуна. Стенка и две равные полки этого бруса были одинаковой толщины, поскольку эта форма особенно подходила для учета поведения профиля при охлаждении металла.

К сожалению, Тредгольд проводил очень узкие испытания, при которых измерялись только прогибы центра под собственным весом

балки. Таким образом, он стоял на самом пороге открытия новой и эффективной конструктивной формы, но его отказ от проведения полного цикла экспериментов не дал убедительных доводов практикующим инженерам.

Фэйрбэйрн полагал, что эксперименты Тредгольда были, вероятно, выполнены за 2 или 3 года до публикации второго выпуска книги Тредгольда в 1824 г., т.е. приблизительно в 1821 или 1822 году. Однако, Фэйрбэйрн чувствовал, что его собственная работа 1824 года была, вероятно, первым серьезным усилием по улучшению пропорции чугунных балок, и последующей работой Фэйрбэйрна и Уатта, было начато исследование относительно роли отдельных полков двутавра.

Тредгольд исследовал случай равных полков, и проблема должна была ждать еще почти 10 лет, пока Итон Ходкинсон (Eaton A. Hodgkinson), британский математик и исследователь сопротивления материалов, определил правильные пропорции для чугунных балок.

Классические эксперименты Ходкинсона были начаты в 1827 году, исходя из нового и непредубежденного подхода, когда было решено искать ответ на вопрос, могла ли бы та же несущая способность быть получена с меньшими количествами металла путем совершенствования формы поперечного сечения [43]. Испытания состояли в доведении балки до разрушения поперечной нагрузкой, и Ходкинсон начал с двутаврового профиля Тредгольда с равными полками (рис. 2.9,а), а затем он увеличивал размер разрушавшегося растянутого пояса до тех пор, пока испытываемый образец не стал ломаться от сжатия в верхнем поясе. Он тогда установил "идеальное" сечение чугунной балки, когда отношение площадей сжатого и растянутого пояса один к шести (рис. 2.9,б).

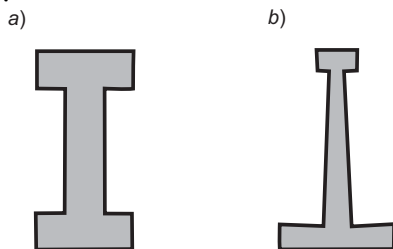


Рис. 2.9. Поперечные сечения чугунных балок

Пропорции для чугунной балки были определены в 1827 г. Ходкинсоном, но приемлемых результатов для использования сварочного железа нужно было ждать, пока Фэйрбэйрн в 1845 году не выполнил его известные эксперименты, связанные со строительством труба-

тых мостов «Британия» и «Конвей». Проектировал эти мосты Роберт Стефенсон (Robert Stephenson), сын основоположника железных дорог Георга Стефенсона (George Stephenson). Стефенсон привлек Фэйрбэйрна к экспериментальному обоснованию конструктивных решений, а своего друга Ходкинсона — к расчетам мостов.

Фэйрбэйрн начал свои испытания с балок скругленной формы, первоначально предложенных Стефенсоном. Исследования начались с представления, что сварочное железо было только менее хрупкой формой чугуна, и первоначальные вычисления были основаны на формуле Ходкинсона для чугунных балок. Но испытания показали, что сварочное железо вело себя иначе, чем чугун, и главной особенностью разрушения оказалось сжатие.

Дальнейшие испытания доказали, что это не было свойством материала, а было связано с выпучиванием металлических листов, явление, не найденное в балках из чугуна из-за их толстостенности. Используя свой опыт в судостроении в применении к мостам, Фэйрбэйрн продолжил конструкцию коробчатой балки (прямоугольной трубы), и впоследствии эта форма была принята для мостов «Британия» и «Конвей».

Независимо от того, как развились исследования, они привели к прекрасной форме прямоугольной трубы с коробчатыми поясами (рис. 2.10,*a*). Трубчатая форма сжатого пояса упрощалась (рис. 2.10,*b-d*), этот переход занял около полдюжины лет, и приблизительно в 1850 г. коробка окончательно уступила место двутавру, когда Изаббарт Кингдом Брюнель (Isambard Kingdom Brunel), еще один известный английский мостостроитель, сумел доказать значительные преимущества составных балок двутаврового сечения над трубчатыми.

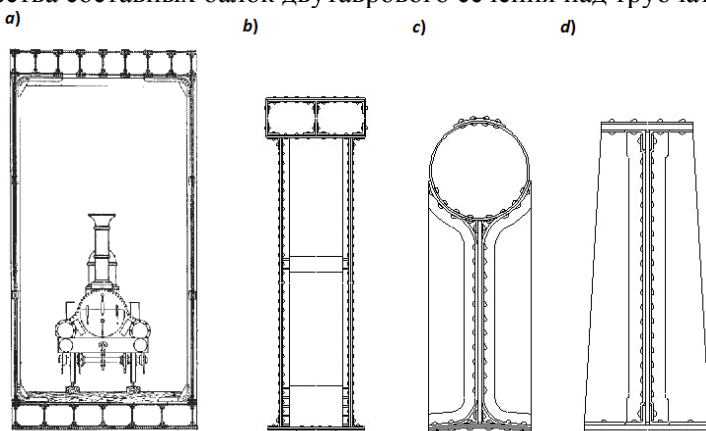


Рис. 2.10. Трансформация коробчатого сечения моста

Одиночная вертикальная стенка двутавровой балки дает заметное сбережение материала сравнительно с двумя стенками трубчатой балки, притом она более обеспечена от порчи ржавчиной и легко доступна осмотру и окраске.

В заключение следует заметить, что основным методом исследований был эксперимент, а не теоретические построения. Английские инженеры в XIX столетии боялись математики. Лишь к концу века теоретический анализ конструктивной формы стал определяющим инструментом ее развития.

Усовершенствования

Развитие строительства привело к увеличению размеров прокатных профилей и к появлению широкополочных двутавров, способных заменить сложные составные сечения из уголков и листов, соединенных заклепками. В 1902 г. в Люксембурге на основе изобретения американского инженера Генри Грея (Grey), запатентовавшего в 1897 году способ прокатки двумя парами валков (одна пара обжимает стенку, другая — полки), был построен первый стан для прокатки широкополочных двутавров [39]. На нем были успешно прокатаны двутавры высотой до 1000 мм при ширине полок до 300 мм. Первые широкополочные двутавры имели уклон внутренних граней полок. В 1914 г. немецкая фирма «Пайне» впервые в мировой практике начала прокатывать широкополочные двутавры с параллельными гранями полок [35] на основе усовершенствования, запатентованного Пуппе в 1911 году (рис. 2.11).

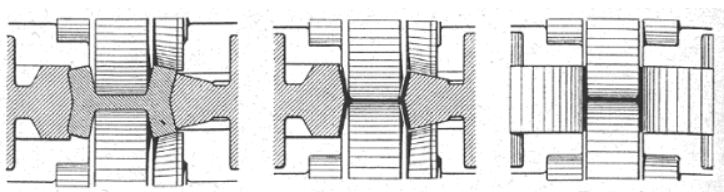


Рис. 2.11. Формирование двутавра на четырехвалковом стане

Высокая эффективность способа прокатки двутавров с широкими полками и параллельными гранями способствовала весьма быстрому его распространению. Производство экономичных двутавров с широкими и параллельными полками получило особенно большое развитие в 1955–1967 гг. К концу этого периода оно составило около 75%

общего производства двутавров в Европейских странах и достигло в 1970 г. 80% общего производства двутавров в США.

С начала XX века начали исследоваться сварные двутавры, которые сперва изготавливались с использованием ацетиленокислородной сварки. Это случилось после того, как в 1903 году французские инженеры Эдмон Фуше (Edmond Fouché) и Шарль Пикар (Charles Picard) сконструировали первую ацетиленокислородную сварочную горелку и получили на нее патент Германии.

С внедрением в технику дуговой сварки толстопокрытых электродов (1912 год) появились новые способы дуговой сварки, после чего газовая сварка постепенно начала вытесняться электрической сваркой. Тогда же появились первые сварные двутавры из трех листов, сперва в кораблестроении, затем и в строительстве.

Наряду с производством прокатных двутавров примерно с 20-х годов XX века разрабатывались различные усовершенствованные способы изготовления сварных профилей, но в связи с пуском высокопроизводительных универсальных балочных станков производство сварных двутавров общего назначения не получило очень широкого распространения.

Основную массу двутавровых профилей в технически развитых странах производят методом горячей прокатки. Наряду с этим применяются усовершенствованные способы производства сварных двутавров в тех случаях, когда получение их методом горячей прокатки практически исключено, а именно: особо тонкостенные балки, профили резко асимметричного сечения, бистальные двутавры, двутавры высотой более 1000 мм и т. п.

Дальнейшие шаги

Дальнейшее развитие конструктивной формы двутавра существенно связано с использованием сварки. Так, например, перспективными являются сечения в виде двутавров, в качестве полок которого используют прокатные тавры и холодногнутые профили.

Снижение металлоемкости может быть достигнуто за счет использования в одной конструкции двух различных марок сталей (бистальные балки). В них целесообразно наиболее напряженные участки поясов выполнять из стали повышенной прочности, а стенку и малонапряженные участки поясов — из малоуглеродистой стали.

Балки с очень тонкой гибкой стенкой появились впервые в конструкциях каркасов летательных аппаратов, где для легкости стенки

выполняли зачастую не из металла, а из прочной ткани (перкаль, брезент). Плоская стенка в такой балке теряет устойчивость в начальной стадии нагружения, приобретая вторую устойчивую форму — в виде наклонно гофрированной поверхности (рис. 2.12.*а*).

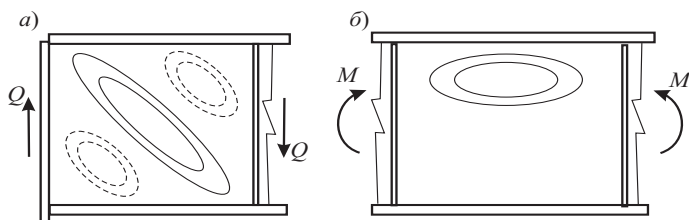


Рис. 2.12. Форма потери устойчивости стенки: *а* — при чистом сдвиге, *б* — при чистом изгибе

После снятия нагрузки эти деформации стенок, называемые часто "хлопунами", исчезают. Они являются дальнейшим воплощением идеи о тесной связи показателей экономической эффективности с понятием тонкостенности.

Тонкостенные сварные двутавры часто имеют переменное по длине сечение, которое эффективно используется в рамных каркасах (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Каркас из двутавров переменного профиля

Стремление повысить эффективность использования металла в работе изгибаемых элементов привела инженеров еще в начале XX в. к оригинальной идее перфорированных балок, позволяющей расширить диапазон использования стального проката. Стенка прокатного двутавра разрезается по зигзагообразной ломаной линии с регулярным шагом с помощью газовой резки или на мощных прессах, и затем обе половины разрезанной балки соединяются сваркой в совме-

щенных между собой выступах стенки. Конечный результат приводит к увеличению высоты балки и позволяет перераспределить материал сечения, концентрируя его ближе к периферийным волокнам (полкам) и существенно повышая такие геометрические характеристики сечения.

Конструктивные решения балок с перфорированной стенкой отличаются большим разнообразием, определяемым способом разрезки стенки (рис. 2.14). Наметив осевую линию разрезки наклонно к полкам, после разрезки и разворота одной из половин балки относительно ее центральной вертикальной оси, получают в результате соединение обеих половин балки переменной высоты.

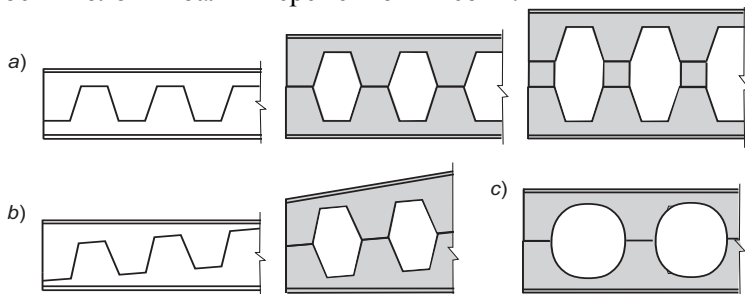


Рис. 2.14. Схема разрезки двутавра

Стремление повысить сечение при умеренном ослаблении поясных тавров и простенков привело к использованию пластинчатых вставок между гребнями соединяемых частей. Это решение может также оказаться высокоэффективным при значительных пролетах и относительно небольшой нагрузке, особенно в тех случаях, когда требуется повышенная изгибная жесткость по условию предельного прогиба.

К одному из первых известных применений перфорированных конструкций относится мост в г. Чикаго (США), построенный в 1910 году. В СССР в конце 30-х и начале 40-х гг. идея использования балок с перфорированной стенкой в строительных конструкциях была предложена и разрабатывалась Ленинградским проектным бюро Проектстальконструкция.

Одним из путей снижения металлоемкости балок является гофрирование их стенок. В обычных балках толщина стенок, как правило, определяется не условием прочности, а требованиями местной устойчивости. Установка поперечных ребер смягчает ситуацию, позволяя уменьшить толщину стенок и одновременно повышая крутильную

жесткость балок, так как ребра играют роль диафрагм и обеспечивают неизменяемость контура поперечного сечения.



Рис. 2.15. Современные облегченные двутавры с перфорированной стенкой:

Еще в середине тридцатых годов XX в. появилась идея гофрирования стенок балок, которое еще более эффективно обеспечит желаемые результаты. Гибкость таких стенок можно повысить до 300...600, к тому же чем тоньше стенка, тем легче выполнить ее гофрирование. Применение профилированного листа для стенки увеличивает жёсткость балки (без дополнительных рёбер) и не допускает, при достижении предела пластичности стали полог, потерю местной устойчивости стенки.

С 60-х годов прошлого столетия экспериментальные и теоретические исследования гофрированных балок (Sin-балок) ведутся во всем мире. Этими работами доказана эффективность такой конструкции.



Рис. 2.16. Конструкция с использованием Sin-балок

По трудоемкости изготовления и расходу металла балки с гофрированной стенкой выигрывают и у балок с гибкой стенкой и у перфорированных балок. Специалисты ZEMAN создали полностью автоматизированную линию по производству сварных двутавровых Sin-балок и эта технология нашла себе широкое применение (рис. 2.16).

Сварные двутавры с гофрированной стенкой могут применяться, практически без каких-либо ограничений, как балки, работающие на изгиб (несущие балки покрытий и перекрытий, ригеля рам), так и элементы, находящиеся под воздействием нормальных сил (колонны, стойки рам).

Очерк третий. КОЕ-ЧТО О МОСТАХ...

Так случилось, что в истории человечества наиболее значительными зарубками прошедших веков являются замки и мосты.

Юхан Вирола «Выдающиеся мосты мира»

История развития мостостроения описана очень подробно, пожалуй как никакая другая подотрасль строительства. Поэтому автор не ставит себе задачу систематически описать историю развития металлических мостов, а остановимся только на некоторых фрагментах. Иными словами — кое-что в мостах.

Первые чугунные мосты

Первый чугунный арочный мост был запроектирован Томасом Притчардом (Thomas Farnolls Pritchard) и построен в 1771-1781 годах Абрахамом Дерби (Abraham Darby) через р. Северн в городке Коэлбрукдэйл (Coalbrookdale) в Англии (рис. 3.1). Пролет арки равен 30,5 м; полный вес моста 378,5 т. Сама арка выглядит как каменное сооружение, в котором растворные швы заменены чугунными, а каменная кладка — сквозными проемами.



Рис. 3.1 Железный мост (Iron Bridge) в Коэлбрукдэйле

Чугунные элементы арок были отлиты на заводе, а затем собраны при помощи шпилек и болтов. За заслуги по возведению моста ли-

тейных дел мастер Абрахам Дерби был удостоен Золотой медали Королевского общества искусств.

Второй чугунный мост (рис. 3.2) пролетом 52 метра был возведен по проекту Томаса Тельфорда (Tomas Telford — впоследствии — первый президент Института гражданских инженеров) в Тьюксбери (Tewkesbury), он более логичен и изящен.



Рис. 3.2. Мост в Тьюксбери

Строительство третьего чугунного моста (рис. 3.3) было завершено в 1796 г. в Уирмаусе (Wearmouth) около г. Сандерленда (Северная Англия). Он имеет пролет 71 м и отношение подъема пролетного строения к пролету, равное 1:7 (у первого моста — 1:2).



Рис. 3.3. Мост через Вер в Уирмаусе

Вот как описывает его историю Дж. Гордон: «Любопытно, что преимущества новой техники мостостроения одним из первых оценил американец Томас Пейн (Thomas Paine), известный в истории как автор "Декларации о правах человека". Пейн спроектировал большой чугунный мост через реку Скуокилл у Филадельфии. Он приехал в

Англию, чтобы заказать чугунное литье, и пока его заказ был в работе, решил навестить в Париже своих друзей-якобинцев. Симпатии к французской революции не помешали Пейну оказаться не только в тюрьме, но и почти на гильотине. Спасло его падение Робеспьера. В отсутствие Пейна его финансовые дела пришли в упадок, чугунное литье было продано и пошло на постройку моста через Вер в Сандерленде» [8].

В конце XVIII в. было решено заменить Лондонский мост, 19 арок которого затрудняли течение реки. Томас Тельфорд представил в 1801 г. проект перекрытия Темзы единственным чугунным пролетом длиной 183 м (600 футов). Комиссия, назначенная для апробации проекта, была не в состоянии понять смысл этого опередившего свое время предложения и отвергла его. Председатель комиссии инженер Джон Ренни (John Rennie) представил свой проект, в соответствии с которым в период с 1825 по 1831 г. был возведен каменный мост, состоящий из пяти полуэллиптических арок. Недавно это сооружение было демонтировано и заново возведено в Аризоне.

Чугунные арочные мосты стали строить повсеместно. Пролеты мостов постепенно увеличивались.

Первый чугунный мост в С.-Петербурге — Зеленый (Полицейский, Народный) — построен в 1806 г. через р. Мойку на Невском проспекте по проекту В. Гесте (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Зеленый мост в Санкт Петербурге

Хрупкость чугуна и недопустимость растягивающих усилий в нем определили конструктивную форму пролета моста в виде арки, а для унификации производства пришлось разбить арочный свод на отдельные части в виде полых ящиков-тюбингов. Болтами они скреплялись в арки, а затем, также с помощью болтов, — в арочный свод. В итоге, выполнив на длине пролета 21,34 м пологую арку со стрелой

подъема всего 1,53м, удалось придать изящество всему строению. Размеры сечений арок из тюбингов были заметно меньше, чем у каменных мостов: толщина свода в замке была всего 45 см, увеличиваясь к пятам до 56 см. Первый опыт оказался настолько удачным, что в 1807 г. утвердили разработанный В. Гесте «образцовый проект», положенный в основу строительства многих чугунных мостов Санкт-Петербурга: Красного по Гороховой ул. (1814 г.), Поцелуева по ул. Глиники (1816 г.), Синего на Исаакиевской пл. (1818 г.), Инженерного 1-го и 2-го у Летнего сада (1826 г.) и многих других.

В 1850 г. по проекту инженера С. В. Кербедза и архитектора А. П. Брюллова возведен первый постоянный чугунный мост через Неву — Благовещенский (Николаевский), ныне — мост Лейтенанта Шмидта (рис. 3.5).

Он был построен в 1843-1850 годах по проекту С.В. Кербедза. Мост имел пролеты по схеме: $32,1 + 36,9 + 42,9 + 46,8 + 42,9 + 36,9 + 32,1$ м. Меняя имена и названия, этот самый длинный мост в Европе середины XIX века оставался неизменным. Почти сто лет исправно служили, не требуя реконструкции, семь стационарных и один разводной пролет, созданные выдающимся инженером Станиславом Кербедзом. И лишь в 1938 году пролетные строения моста заменены стальными сварными балками.



Рис. 3.5. Мост Лейтенанта Шмидта

Арочные мосты из чугуна строили повсеместно до середины XIX века, затем чугуну на смену пришло сварочное железо, а затем и стали. Первый большой арочный мост из стали (Аркольский) был построен в Париже 1853 году.

Первые висячие мосты

Вантовые мосты придуманы очень давно, если не принимать во внимание подвешенных на кованых цепях подъемных мостов через крепостные рвы, то первым из них считается мост венецианского инженера Фаусто Веранчи (Faustus Verantius), который применил цепи для устройства постоянного моста в начале 1600-х годов [40]. Далее, в 1741 году в Англии был построен цепной мост через реку Твид, а в 1784 году немецкий плотник Лохер (С. J. Locher) построил деревянный цепной мост в городе Фрибург. Правда, цепи приобрели форму кованых пластин, шарнирно соединенных друг с другом.

Но в том смысле, как мы это понимаем сегодня, висячие мосты появились в Америке. В 1801 году в штате Пенсильвания мировой судья Джеймс Финлей (James Finley) построил первый, подвешенный на железных цепях мост, с пролетом 21 м (рис. 3.6.), в 1808 году он получил патент на свою систему с балкой жесткости из сварочного железа, а в 1810 году опубликовал работу «Описание патента цепного моста».

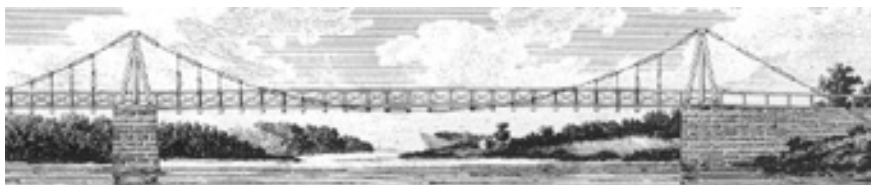


Рис. 3.6. Мост Финлея

До своей кончины в 1828 году Финлей спроектировал еще около 13 мостов, большинство из которых разрушились. Вторым его мостом в 1807 году был мост с пролетом 39 м. Далее строительство висячих мостов пошло очень быстро, особенно в Америке.

Первый в Европе висячий мост с проволочным кабелем был построен в 1823 году французским инженером Марком Сегюном (Marc Seguin) и имел пролет 40 метров. Тогда же началось строительство висячих мостов в России в Петербурге. Французский инженер П. Базен (Pierre-Dominique Bazaine) в 1823 г. построил пешеходный мост с пролетом 15,25 м в Екатерингофском парке возле Петербурга. Инженеры Г.М. Треттер и В.А. Христианович построили 2 цепных моста через Фонтанку. В 1824 году был построен Пантелеймоновский мост с пролетом 43 м и шириной 10,7 м, стрела провисания цепи составляла 1:10 пролета.

В 1825 году Томас Телфорд (Thomas Telford) построил подвесной мост через пролив Менай в Англии (рис. 3.7). Этот мост принес Телфорду мировое признание, его центральный пролет длиной в 166 м долгое время оставался непревзойденным. Цепи, использованные Телфордом, как и большинство подвесных цепей в мостах того времени, состояли из пластин, соединенных между собой болтами подобно цепям современных велосипедов. Каждое звено этой цепи было испытано на месте строительства, и ему была гарантирована прочность. Телфорд считал, что мост через Менай имеет максимально возможную для подвесного моста длину пролета (для материалов того времени). Хотя Брюнель в свое время показал, что Телфорд был слишком осторожен (Клифтонский мост Брюнеля имел пролет 190 м), все же в течение многих лет пролет моста через Менай оставался рекордным.



Рис. 3.7. Мост через Менай



Рис. 3.8. Висячий мост через Дунай в Будапеште

В середине XIX века английские инженеры построили в Европе выдающиеся мосты: в 1849 году английским инженером Кларком (E. Clark)) был построен висячий мост в Будапеште с пролетом 209 м, в 1853 году было окончено строительство большого цепного моста через Днепр в Киеве с пролетами 138 м, выполненного по проекту Чарльза Виньоля.

Первоначальное строительство висячих мостов сопровождалось ожесточенными спорами по поводу формы и конструкции кабеля. Великобритания одобряла цепи из сварочного железа из отдельных звеньев, как имел в виду Финлей, в то время как французские инженеры применяли стальные тросы, различие, в значительной степени объясняющееся структурой металлургической промышленности в этих странах. Франция заметно опережала Англию в этом деле, по свидетельству [5] в 1825-1842 годах появилось 147 висячих мостов, из них 114 во Франции, но затем авария на одном из них надолго остановила Францию, и инициатива перешла к США.

Мосты из сварочного железа

Клепанные конструкции из сварочного железа обязаны своим зарождением, частично ростом сомнений относительно безопасности чугуна при его работе на изгиб и частично успешному опыту постройки железных судов. Однако, самый большой вклад не только в развитие клепанных балочных систем, но и во внедрение сварочного железа как доминирующего материала, сделал проект строительства трубчатых мостов «Британия» (рис. 3.9) и «Конвей», особенно первый.

Мост «Британия» имел пролеты $71,9+2\times 140+71,9$ м и коробчатое пролетное строение, езда поездов осуществлялась внутри пролетного строения. Первоначально мост строился как подвесной, но после испытания балки нагрузкой, ее жесткость и прочность оказалась достаточной и без подвеса на цепи, хотя пилоны уже были построены.

Ключевыми фигурами, как было уже сказано в предыдущем очерке, здесь были Роберт Стефенсон, управлявший строительством железной дороги; Вильям Фэйрбэйрн, практикующий инженер с опытом постройки железных судов; и Итон Ходкинсон, теоретик и экспериментатор.

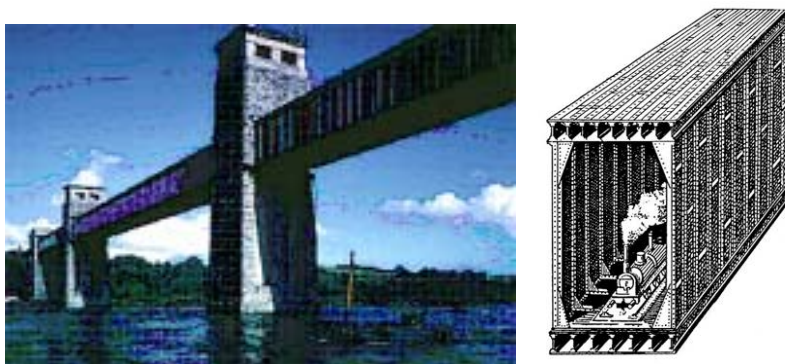


Рис. 3.9. Мост «Британия»(общий вид и фрагмент)

Эта «большая тройка» установила, что конструкция из сварочного железа была более слабой при сжатии, чем при растяжении, доказала, что прямоугольная труба будет более сильной при изгибе, чем круглая или овальная, выделила как самостоятельную проблему деформации тонкой пластины и показала, как противодействовать ее нежелательному поведению при помощи клетчатых ребер.

Таким образом, эти три человека и их помощники узаконили клепаную конструкцию из сварочного железа как подходящую для балок любого размера. Далее, основываясь на теоретических разработках из Франции, они продемонстрировали преимущества неразрезности балок и, наконец, доказали, что сопротивление заклепок зависит в большей мере от обжатия, чем от чистого среза. Немало, не правда ли?

Новаторству конструктивной схемы соответствовало и новаторство в производстве работ, которые выполнялись под руководством инженера Кларка. В своей книге [34] Кларк пишет о ясном понимании проблемы необходимости выравнивания деформаций в опорных и пролетных сечениях неразрезной балки практически постоянного сечения.

Для того, чтобы осуществить это выравнивание, использовался остроумный прием сборки моста (рис. 3.10). Сначала укладывалась труба, перекрывающая наибольший пролет СВ. При изготовлении стыка В смежная труба АВ устанавливалась под некоторым углом к горизонту, и в этом положении осуществлялась клепка стыка. Когда секция АВ принимала горизонтальное положение, на опоре В возникал изгибающий момент, величина которого зависела от угла наклона секции АВ к горизонту. Аналогичную операцию выполняли и с секцией CD и DE.

По-видимому, это был первый в истории случай сознательного регулирования усилий.

а)



б)

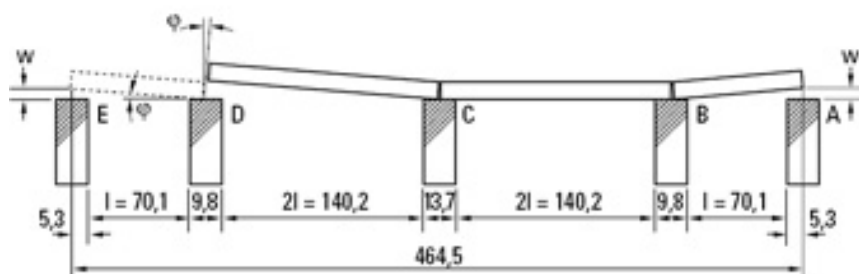


Рис. 3.10. Сборка моста: а - общий вид, б – схема монтажа пролетов

Следует заметить, что одновременно с этой главной работой по мостам «Британия» и «Конвей» Стефенсон отвечал за строительство всей железной дороги. Здесь возводились шестипролетный «Высокий мост» (High Level Bridge) в Ньюкасле с чугунными арками и непродуманный мост в Честере, где были использованы чугунные неразрезные балки, которые разрушились в 1847 г. вскоре после открытия этого моста. Такое напряжение в работе привело и к конфликтам внутри большой тройки, как это произошло между Стефенсоном и Фэйрбэйрном.

Мост «Британия» был раскритикован за то, что он перерасходовал материал на стенки балок по сравнению с эквивалентной сквозной конструкцией, но это вряд ли справедливо, учитывая уровень знаний о работе ферменных конструкций в середине 1840-х годов.

Достаточно посмотреть на приведенные на рис. 3.11 ферму моста, которую в 1850 году запатентовал Виппл (Whipple), где сжатые элементы были выполнены из чугуна, а растянутые — из сварочного

железа, и сопоставить ее схему с современными схемами с раскосной, треугольной или полураскосной решеткой, чтобы убедиться в этом.



Рис. 3.11. Ферма Виппла на испытаниях

Дело в том, что расчеты ферм носили условный характер, и инженеры скорее основывались на эмпирике, чем на теории.

Тем не менее, после успеха первых трубчатых мостов многочисленные мосты всех форм и размеров начали строить во всех странах из сварочного железа. К их числу принадлежал и фатальный мост Томаса Боуча (Thomas Bouch) через реку Тэй, открытый в 1878 году¹.

Во Франции были сооружены большие арки Густава Эйфеля (Gustave Eiffel), которые теперь всемирно известны. Железо позволило конструкторам отойти от традиционной формы арки в виде дуги окружности, подсказанной практикой строительства каменных мостов, и применять самые разнообразные очертания. Эйфель, сыгравший большую роль в развитии металлического мостостроения, в поисках формы, наиболее соответствующей требованиям статики сооружений, на основе многочисленных исследований пришел к выводу, что наиболее рациональным профилем является параболический, и смело применил их в своих мостах в через реку Дуро в Португалии (1877 год) и в виадуке Гараби (рис. 3.12) пролетом в 165 м, построенном в 1884 году.

Этими сооружениями заканчивался период использования сварочного железа в мостостроении, хотя следует добавить, что уже арки Эйфеля в своей конструкции частично имели сталь.

¹ Об аварии этого моста смотрите далее



Рис. 3.12. Виадук Гараби

История мостовой фермы

Шедевр первого периода — мост «Британия», представлявший собой сплошную металлическую трубу прямоугольного сечения, обладал огромным весом. Это заставило впоследствии строителей заменить сплошную стенку решеткой, которая уменьшила весовые показатели почти вдвое. Построенный немецким инженером Ленце почти одновременно со степенсоновской «Британией» трубчатый мост через Вислу в Диршау имел уже не сплошную, а стержневую конструкцию.

Развитие железных дорог в первой половине XIX века играет большую роль в инженерном деле. Железные дороги создали срочную потребность в мостах, способных нести тяжелые движущиеся грузы, и в новых формах зданий для вокзалов и системы обслуживания подвижного состава. Прорыв, который потребовался для удовлетворения этих потребностей, ускорял развитие научных принципов механики применительно к проектному делу и способствовал новым идеям в производстве и изготовлении металлических конструкций. В частности, к середине девятнадцатого столетия инженеры поняли и применили принципы механики в проектах такой конструктивной формы, как ферма. Это понимание инициировало появление целого ряда новых конструктивных схем.

Первые фермы с параллельными поясами появились на железнодорожных мостах Великобритании в 1840-х, они были железными

версиями фермы, запатентованной Тауном (Ithiel Town) в 1820 году (см. рис. 3.13).

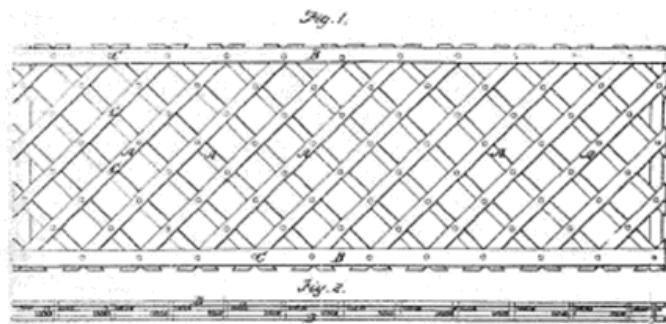


Рис. 3.13. Рисунок из патента Тауна

Основоположником новой системы стал английский инженер Бартои, который при строительстве моста через реку Бойя около Дродхеда воспроизвел в металле многорешетчатую деревянную ферму Тауна. Его мост положил начало победному шествию сквозной балочной конструкции.

Первым русским мостом с железными формами был небольшой мост через р. Стрелку на СПб-Петергофской железной дороге, открытой для движения в 1857 г. Одновременно с ним, в 1853–1857 гг., был построен двухпролетный неразрезной железный решетчатый мост через р. Лугу на СПб-Варшавской железной дороге (пролеты по 55,2 м) по проекту Кербедза. Этот мост построен по системе Тауна, но сжатые раскосы были запроектированы не из полос, а впервые жесткими — из полос с приклепанным к ним уголком.

В 1848 году Джеймс Уоррен (James Warren) и Теобальд Монзани (Theobald Monzani) запатентовали ферму с параллельными поясами и решеткой в виде равносторонних треугольников.

Точное происхождение фермы, составленной только из повторяющихся идентичных треугольников, неясно. Очевидно, сначала она использовалась в северной Италии, а в конечном счете переместилась к Англии через Францию и Бельгию. Альфред Генри Невилл, английский предприниматель и инженер, построил несколько таких мостов во Франции и Бельгии в течение конца 1830-х и в начале 1840-х, используя конфигурацию повторных равнобедренных треугольников, которые поддерживали дорожное полотно в среднем уровне. Невилл, Нэш и др. получили французский патент для такого проекта в 1838, и в 1839 Уильям Нэш получил британский патент для такого же самого проекта (рис. 3.14). И только в патенте Уоррена и Монзани дорожное

полотно могло располагаться на верхнем или нижнем поясе фермы (рис. 3.15).

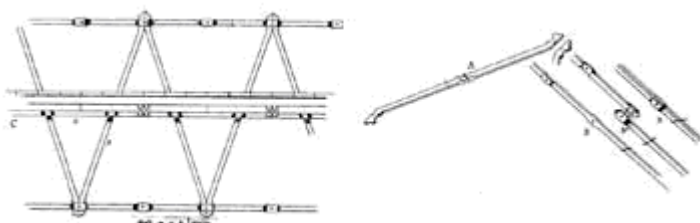
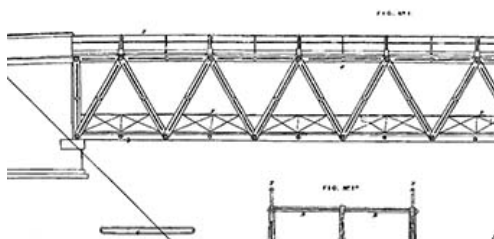


Рис.3.14. Рисунок из патента Невилла

Имя Уоррена стало синонимичным с этой формой, поскольку первые мосты, использующие эту конфигурацию, были построены в Англии, и английские строительные фирмы использовали такие мосты в британских колониях, особенно в Индии.

В 1851 году был построен мост через дамбу в Ньюарке-на-Тренте (Newark Dyke Bridge) с пролетом 240 футов (73,15 м) с фермами Уоррена (рис. 3.16), это строительство послужило поводом для сопоставления трубчатой балки Стефенсона и фермы Уоррена. В публикациях отмечалось, что неуверенность в правильности расчетов ферм вызывала беспокойство и что фермы "являются вопросом для дальнейшего исследования и эксперимента" даже при том, что реальный мост был проверен на действие нагрузки прежде, чем был сдан в эксплуатацию.

а)



б)



Рис. 3.15. Ферма Уоррена: а – рисунок из патента Уоррена и Монзани, б – мост с ездой понизу

Отмечалось также, что у фермы Уоррена отказ одного элемента будет грозить разрушением моста, эта особенность статически определимых систем, была уже понятной инженерам того времени.



Рис. 3.16. Мост в Ньюарке-на-Тренте

В Соединенных Штатах первым начал строить ферменные деревянные мосты Стивен Гарриман Лонг (Stephen Harriman Long). В августе 1829 он построил деревянный мост недалеко от Балтимора. Важной особенностью системы Лонга было использование клиньев, с помощью которых осуществлялось преднапряжение, а именно сжатие раскосов. Таким образом, без нагрузки обе диагонали были сжаты, в то время как оба пояса и вертикальные стержни были растянутыми.

Переход от дерева к металлу в 40-х годах XIX века в Соединенных Штатах сопровождался градом патентов. Уильям Гау (William Howe) заменил вертикальные деревянные элементы у фермы Лонга железными прутами и получил патенты для его ферм в 1840 и в 1846 году. Как и у Лонео, в ферме Гау деревянные диагонали были сжаты, Гау вместо клиньев на диагоналях использовал натяжение вертикальных элементов.

В 1844 Томас Пратт (Thomas Pratt) запатентовал ферму с железными диагоналями. Его ферма могла преднапрягаться клиньями на вертикальных стойках или растяжением диагоналей, то есть ее поведение было точно таким же, как фермы Лонга. Но проекты Гау и Пратта было легче реализовать, и они стали очень популярными.

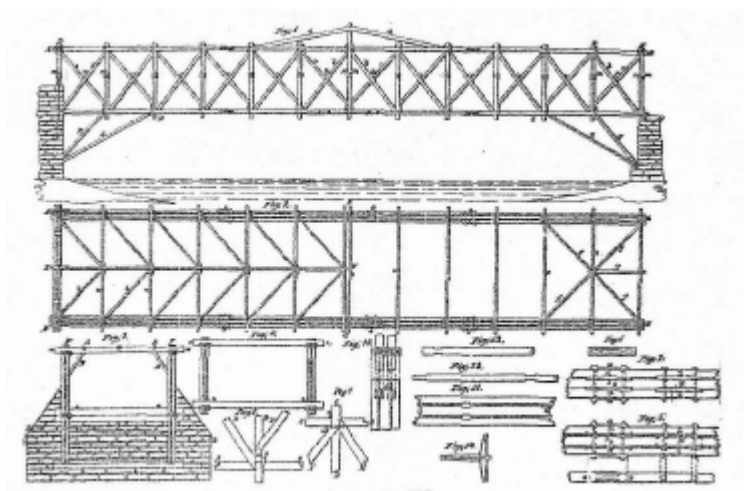


Рис. 3.17. Мост Лонга по патенту 1830 года

Первоначальная схема решетки в ферме Томаса Пратта (рис. 3.18) была модифицирована в 1847 году в патенте Виппле (Square Whipple) в виде двоянной (рис.3.19.а) или строенной (рис. 3.19.б) решетки Пратта.



Рис. 3.18. Решетка Пратта



Рис. 3.19. Решетки Виппле

В 1858 г. Альберт Бриггс (Albert Briggs) получил патент для моста в комбинации железа и древесины (рис. 3.20). Не проливая свет на то, что было фактически построено тогда, патент ясно устанавливает, что американское понимание конфигурации Уоррена существовало до Гражданской войны.

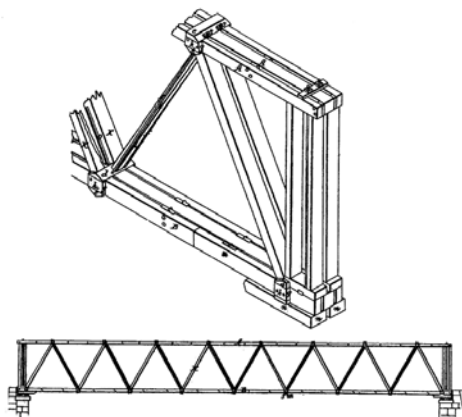


Рис. 3.20. Ферма Бриггса

В 1870-х годах появилось еще несколько американских патентов, основанных на использовании треугольной схемы Уоррена. Два были получены Праттом: один в 1871 году для железной фермы и второй в 1873 году для фермы из дерева. Схема Уоррена модифицировалась в виде треугольной решетки с вертикальными распорками (Warren with verticals – рис.3.21) и полидиагональной решетки (Warren Quadrangular – рис. 3.22).



Рис. 3.21. Ферма Уоррена с вертикалями



Рис. 3.22. Полидиагональная решетка

Идея растянутых раскосов была доведена до полной реализации в ферме Венделла Боллмана (Wendell Bollan) который ориентировал дополнительные раскосы на в верхние узлы концевых стоек (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Ферма Боллмана

В 1868–1870 годах по проекту Альберта Финка (Albert Fink) был построен огромный 396-футовый (118,16 м) мост через реку Огайо в Луисвилле. Здесь впервые было применено вторичное дробление панелей у верхнего пояса. Спустя год после того, как строительство было закончено, Финк получил патент для этой конфигурации (рис. 3.19).

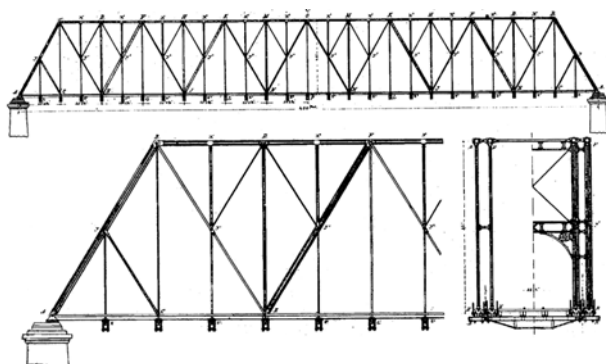


Рис. 3.24. Рисунок из патента Финка

Прыжки в длину — погоня за рекордами

Разработка упрощенных типов мостовой решетки не сразу привела к вытеснению старой многораскосной системы. Примером может служить мост «Понте-де-Дона-Мария-Пиа», построенный на границе Португалии и Испании в 1885 году по проекту инженера Густава Эйфеля (рис. 3.25). Избыточное количество раскосов полагалось положительным явлением, так как считалось, что при выходе из строя одного из раскосов заработают соседние. Ведь расчеты ферм носили тогда условный характер, и инженеры скорее основывались на эмпирике, чем на теории.



Рис. 3.25. Мост «Понте-де-Дона-Мария-Пиа»

Дальнейшее совершенствование ферм происходило за счет новых разновидностей сечений их элементов и конструкций. Большие пролетные возможности открывала консольная конструкция. Лежащая в ее основе идея увеличить пролет балки с опорой не на вертикальный устой, а на укрепленную на этом устое консоль, ведет свою историю от плотников первобытного общества. В металлическом мостостроении ее использовал в 60-х годах XIX в. немецкий инженер Гербер (Gerber), который для упрощения расчетов предложил устраивать шарниры в местах нулевых моментов неразрезной балки.

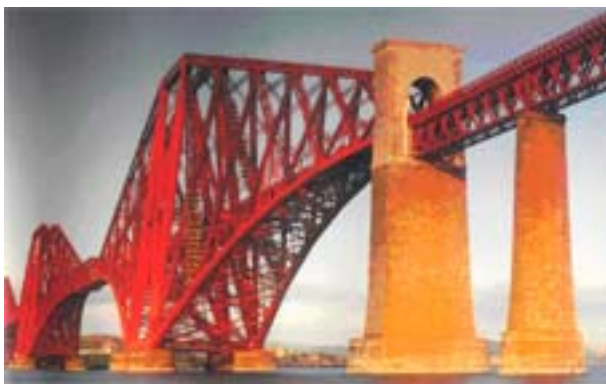


Рис. 3.26. Мост через Фортский пролив

По этой системе Джон Фаулер (John Fowler) и Бенжамин Бейкер (Benjamin Baker), в 1883–1890 гг. построили мост через Фортский пролив. Уложив 107-метровые балки на пару консолей выносом в 207 м каждая, они смогли получить пролет в 521 м (рис. 3.26). Его удалось превзойти только в 1916 году строителям такого же моста в Квебеке (Канада) с выносом консолей 181 м и балкой 187 м (рис. 3.27).



Рис. 3.27. Квебекский мост

Бейкер и Фаулер воспользовались трубчатыми стержнями диаметром 3,7 м, склепанными из толстых листов стали. Из них соорудили гигантские пилоны с симметрично приклепанными к ним огромными консолями.

Консольная схема Гербера использовалась Н.А. Белелюбским в конструкции построенного в 1897 году моста через Обь и в конструкции построенного в 1905 году моста через приток Волги Бузан (рис. 3.28). Пролеты Обского моста через один опираются на консоли

смежных пролетов и разгружают их, то же самое относится к среднему пролету Бузанского моста (схема – 32+164+32 метра).

В это же время интенсивно развивались конструкции арочных мостов. Замена сварочного железа, позволившего достигнуть у арки пролета 160 м, стальной конструкцией уже в 1898 г. подняло эту величину до 205 м при строительстве моста через Ниагару.



Рис 3.28. Мост через Бузан

В стремлении преодолеть зависимость арочных конструкций от прочных скалистых опор на берегах в арках применили затяжку. С ее помощью в 1916 г. пролет железнодорожного моста через Ист-Ривер достиг 298 м. Этот мост со звучным названием «Ворота в Ад» (Hell Gate) проектировали и строили Густав Линдентел (Gustav Lindenthel) и два его ассистента Омар Амман (Othmar Ammann) и Дэвид Штейнманн (David Steinman). Мост стал этапным событием в развитии арочных мостов. Идеи этого моста впоследствии были использованы на двух еще более грандиозных сооружениях.

В 1924 году в Сиднее в Австралии и в 1928 году в Нью-Йорке в США приступили к строительству самых больших арочных мостов. Строительство моста через Сиднейскую Гавань было завершено в 1932 году, пролет моста составил 503 м (рис. 3.29). Омар Амман был автором моста Kill Van Kull или Bayonne Bridge в Нью-Йорке, строительство которого было окончено в 1931 году. Пролет моста составил 503,6 м, т. е. на 0,6 м больше, чем у моста в Сиднее; но, несмотря на несколько больший пролет, признанным лидером среди арочных мостов все равно является мост в Сиднее, так как он самый широкий.



Рис. 3.29. Мост через Сиднейскую Гавань

Выразительность облика арочных мостов широко используется архитекторами и инженерами. При этом зачастую используются весьма необычные решения (рис. 3.30, 3.31).



Рис. 3.30. Котлярский арочный мост в Кракове, пролет 166 м



Рис. 3.31. Автодорожный мост в Южном Китае

Однако решетчатая арка не устранила принципиального недостатка всех стержневых конструкций — возможности выпучивания сжатых элементов. Это побудило инженеров обратиться к висячим решениям, в которых основные несущие элементы (цепи, ванты, тросы) работали в наибольшем соответствии со специфическим свойством железа, — лучше всего работать на чистое растяжение. И в гонку за рекордными пролетами вступили висячие мосты, в особенности после того, как начали использовать тросовую конструкцию.

Первый в Европе висячий мост с проволочным кабелем был построен в 1823 году французским инженером Марком Сегюном (Marc Seguin) и имел пролет 40 метров, но уже в 1840 году в Фрейбурге (Швейцария) был сооружен кабельный мост пролетом 273 метра. К 1850 году Франция построила несколько сотен висячих мостов, в то время как Великобритания имела их не больше дюжины. Если бы французы предусмотрели защиту проволок в тросе, то все, возможно, было бы хорошо, но они не сделали этого, и коррозия стала главной проблемой, окончившейся в 1850 обрушением висячего моста Basse-Chaine, когда погибло 226 человек. После этого строительство висячих мостов во Франции почти остановилось на много лет. Однако, основанный на французском влиянии, трос вытеснил цепи и наборы шарнирных звеньев сперва в Америке, а затем стал фактически стандартом во всем мире.

Особую роль здесь сыграл изобретенный Джоном Августином Риблингом (John Augustus Roebling) механизированный способ плетения гибких канатов из тонких стальных проволок непосредственно на месте строительства. Сперва Риблинг производил канаты, а затем занялся постройкой висячих мостов. Он построил мост пролетом 236 метров над Ниагарой чуть ниже знаменитого водопада, затем знаменитый Бруклинский мост с главным пролетом 485 метров (рис. 3.33). Этот мост строился в 1833-1866 годах, сначала под руководством Джона Августина Риблинга, а после его кончины под руководством его сына Вашингтона Лилина Риблинга (Washington Lilian Roebling). Его поддерживают четыре мощных каната из 5296 проволок диаметром 4 мм. Этот мост — веха в истории строительного искусства, архитектуры, мостостроения в частности.

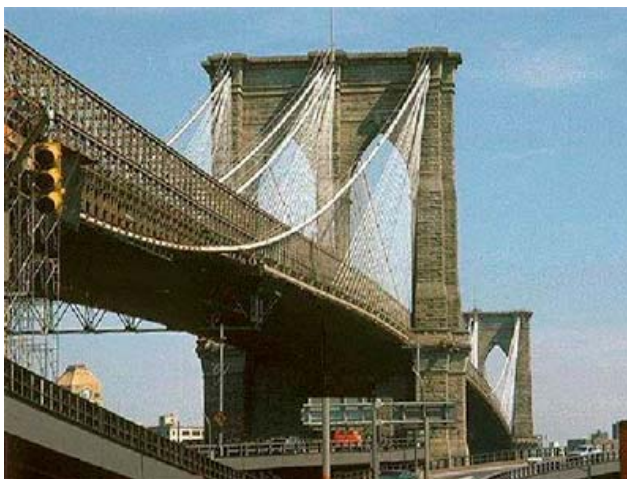


Рис. 3.33. Бруклинский мост

Бруклинский мост стал гордостью Нью Йорка, о нем писали многие, в том числе и Владимир Маяковский:

*Я горд вот этой стальной милей,
живьем в ней мои видения встали -
борьба за конструкции вместо стилей,
расчет суровый гаек и стали.
Если придет окончание света -
планету хаос разделяет в лоск,
и только один останется этот
над пылью гибели вздыбленный мост,
то, как из косточек, тоньше иголок,
тучнеют в музеях стоящие ящеры,
так с этим мостом столетий геолог
сумел воссоздать бы дни настоящие.*

Соперничество венгерских и американских строителей продолжено сооружением в 1898–1903 гг. еще одного цепного моста — Эржебетс пролетами $44 + 290 + 44$ м в Будапеште. Его цепи впервые после Пантелеймоновского моста закреплены на металлических, а не на каменных пилонах. В том же году закончен еще один мост через Ист-Ривер в Нью-Йорке — Вильямсбургский, четыре каната которого закреплены также на металлических пилонах. Главный пролет 486,4 м. Шесть лет спустя закончено строительство третьего моста через Ист-Ривер в Нью-Йорке — Манхеттенского. У него металлические пилоны, главный пролет чуть меньше — 448 м и, в отличие от Бруклинского, проезжая часть этих мостов поддерживается только вертикальными подвесками.

Цепной мост через Рейн в Кельне ($92,2+184,5+92,2$ м), построенный в 1915 г., во многом похож на мост Эржебет в Будапеште. Однако его отличает то, что натяжение цепей передано на балки жесткости, а не на специальные фундаменты. А в 1926 году был построен висячий мост через реку Делавар в Филадельфии с рекордным в то время пролетом 534 м и стальными пилонами высотой 114 м.

Далее, новый кабельный мост Георга Вашингтона над Гудзоном в Нью-Йорке (1931) преодолел километровый пролет: $198+1068+198$ м, а в 1933–1937 гг. по проекту И. Страусса (Joseph Strauss) построен мост через пролив Золотые ворота (Golden Gate Bridge), соединивший берега Тихоокеанского залива, на котором расположен город Сан-Франциско. Этот мост (рис. 3.34) стал одной из достопримечательностей Америки. Его пролеты $343+1280+343$ м, высота пилонов 227 м. Этот мост долго удерживал рекорд длины пролета, который не решались превзойти строители еще нескольких мостов: через озеро Мичиган — $584,6+1158+584,6$ м (1957), в Нью-Йорке — $370+1299+370$ м (1964), через Тахо в Лиссабоне — $98,6+483,4+1012,9+483,2+99,6$ м (1966), через Босфор — $231+1074+255$ м (1973).



Рис. 3.34. Мост через пролив Золотые ворота

Лишь в 1964 году рекорд Golden Gate Bridge был улучшен на 12 метров строительством моста Версано-Нароуз пролетом 1298 м в Нью Йорке, но истинный серьезный шаг в гонке за рекордные пролеты был сделан в 1981 году, когда в Англии по проекту Б. Вудза построили мост «Хамбер» с русловым пролетом 1410 метров (рис. 3.35).



Рис. 3.35. Мост Хамбер

Следующее улучшение рекорда произошло в 1998 году, когда был построен мост через пролив Great Belt (Дания) с пролетом 1624 метров и, наконец, обладатель абсолютного на сегодня рекорда — японский мост Акаси-Кайкё с пролетом 1991 метр (рис. 3.36).

Все названные выше мосты — висячие, а в 50-х годах XX века произошел возврат к вантовым мостам в чистом виде и, в первую очередь, потому, что они допускают навесной монтаж. Такой способ возведения широко используется при строительстве вантовых мостов.



Рис. 3.36. Мост Акаси-Кайкё

Первый из современных вантовых мостов с пролетом 183 м был мост через фиорд Стромзунд в Швеции, построенный в 1955 году мостостроительной фирмой Демаг по проекту немецкого инженера Дишингера (Franz Dischinger). Далее, за период около 20 лет было построено и строилось более 60 вантовых автодорожных мостов в мире, и подавляющая их часть в Западной Германии.

В какой-то мере, знаковым здесь было сооружение вантового моста в Кельне (Severinsbrücke), первоначальный проект которого был

отвергнут, так как его высокие пилоны мешали бы виду на Кельнский собор — своеобразный символ Кельна. Архитектор Ломер (G. Lohmer) и инженер Фишер (G. Fischer) предложили новое тогда решение моста с одним А-образным 85-метровым пилоном, сдвинутым к противоположному от собора берегу (рис. 3.37). Острый силуэт пилона уравнивает объем собора на другом берегу Рейна, Проект Ломера был реализован в 1955–1959 гг. Шесть пар радиальных вант, расходящихся по три по обе стороны от пилона, образуют благодаря его форме геометрически неизменяемую конструкцию над основными пролетами моста 301,67 + 150,68 м.



Рис. 3.37. Вантовый мост в Кельне

Пролеты вантовых мостов непрерывно растут. В 1994 году был построен мост Нормандия (Pont de Normandie) в устье реки Сены возле Гавра во Франции. Главный пролет моста 856 м, а высота пилонов 214 м. Но рекордсменом среди вантовых мостов является мост через пролив Татара, построенный в Японии в 1999 году. Японцы хотели установить очередной рекорд, и, зная о том, что во Франции сооружается мост с пролетом 856 м, решили достичь пролета 890 м на новом мосту Татара (рис. 3.38). Недавно построенный вантовый мост во Владивостоке через пролив Босфор Восточный (рис. 3.39) перекрыл и этот рекорд. Самый длинный в мире вантовый пролет протяженностью 1104 м протянулся между двумя пилонными опорами высотой 320 м. Держат мост над зеркалом воды на высоте 70 метров ванты общей длиной более 54 километра.

Упомянутые выше вантовые мосты точнее следовало бы назвать вантово-балочными, поскольку в общей игре сил балка жесткости, воспринимающая распор вант, играет не второстепенную роль. Имеются, однако, и чисто вантовые решения, где балка жесткости отсут-

ствует или играет роль легких ходков. К таким решениям принадлежат трубопроводные переходы и пешеходные мосты.

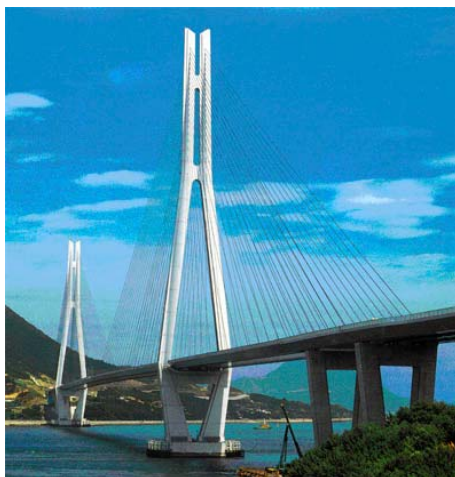


Рис. 3.38. Мост Татара



Рис. 3.39. Вантовый мост во Владивостоке

Стальная водопроводная или газовая труба трубопроводного перехода служит «пролетным строением», но не воспринимает распор. Такие конструкции использовались для подачи материалов при строительстве Сталинградской ГЭС (пролет 874 м), трубопроводного перехода через Аму-Дарью длиной 660 м, аммиакопроводного перехода через Днепр пролетом 720 м (рис. 3.40), и в других случаях.

Возрастание пролетов у мостов различной конструкции иллюстрирует график, представленный на рис. 3.41. На нем светлым квадратом

обозначены балочные мосты, темным квадратом – фермы, ромбом – консольные мосты, треугольником – арочные, темным кружком – висячие и светлым кружком – вантовые мосты.



Рис. 3.40. Аммиакопроводный переход через Днепр

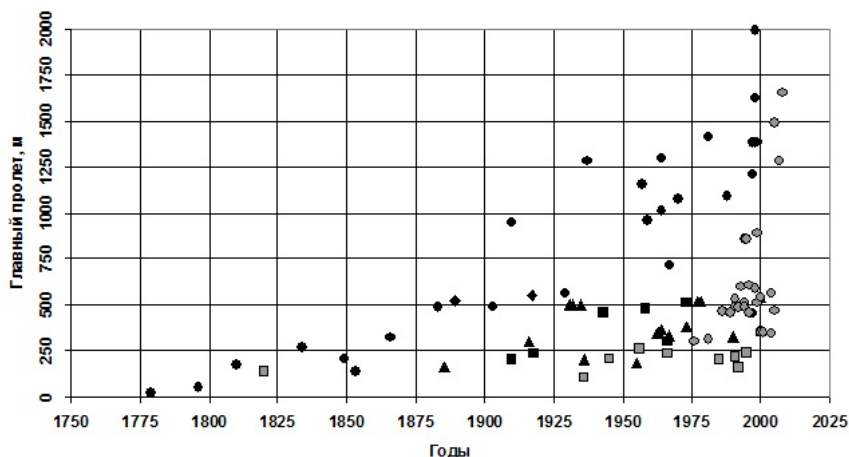


Рис. 3.41. Рост пролетов

Первый цельносварной мост

Во время обзорной экскурсии по Киеву Вам гиды непременно расскажут, что построенный в 1953 году мост им. Патона является первым в мире цельносварным мостом, где даже монтажные стыки выполнены на сварке. Об этом же пишет Википедия в статье «Мост Па-

тона», в этом пытается убедить студентов учебник [19], но в фундаментальном трехтомном справочнике [22], изданном под эгидой института электросварки им. Е.О. Патона, о нем уже говорится как о первом в мире большом мосте, целиком выполненном с использованием сварки.

А кто же здесь действительно был первым?

По-видимому, историю следует начать с 1928 года, когда практически одновременно на расстоянии около 12000 километров друг от друга Виктор Петрович Вологдин во Владивостоке и Сетфан Брыла (Stefan Bryla) в Варшаве начали работы по проектированию и строительству небольших сварных мостов. Чуть позже к таким же работам приступил Франтишек Фалтус (František Faltus) в Праге.

Внук С.П. Вологодина пишет [28]: «И вот в 1928 г. дед решил построить мост. Строго говоря, это был не мост, а переход над железнодорожными путями в районе Эгершельд (или, как принято было говорить, "на Эгершельде"). Длина этого сооружения составила 25,08 м. Когда-то я специально занимался вопросом об этом мосте. Дело в следующем: в журнале "Наука и жизнь" мне попалась статья о том, что приоритет в Европе в области сварного мостостроения принадлежит какому-то польскому инженеру. Мои раскопки позволили установить, что, хотя у поляка мост был несколько длиннее, дедов был построен по крайней мере на месяц раньше».

Мост профессора Владивостокского политехнического института (сейчас ДВГТУ) В.П. Вологодина существует и сейчас (рис. 3.42), он расположен между улицами Верхнепортовой и Казанской, проходит над рельсами Транссиба, его построили летом 1928 г. всего за 25 дней.



Рис. 3.42. Мост С.П. Вологодина

В 1929-30 гг. сварен второй подобный мост. Причём при его строительстве впервые были применены трубчатые элементы. Испытание обоих сооружений дало замечательные результаты, ибо наблю-

далось полное совпадение теоретического прогиба при нагрузке с действительным. Совершенно отсутствовал остаточный прогиб — явление обычное при постройке клёпанных мостов.



Рис. 3.43. Мост Стефана Брыла

Запроектированный в 1927 году Стефаном Брыла относительно маленький (пролет 27 метров) дорожный мост на реке Слудва около Лович, был установлен в 1928 году. Профессор Стефан Брыла — известный польский ученый и конструктор. Проектированию моста предшествовали многие годы исследований сварных узлов и установление правил их применения в строительстве.

Мост, как и многие другие конструкции в Польше, был поврежден во время Второй мировой войны (одна из его опор была взорвана). После войны его восстановили и использовали в течение еще тридцати лет. Позже этот мост шириной всего 6.2 м перестал удовлетворять требованиям дорожного движения, и было намерение его снести. Благодаря интенсивным усилиям Польской ассоциации инженеров-строителей мост было признан как памятник инженерного искусства. Он в 1977 году был перемещен на 25 метров вверх по реке и превращен в музей на открытом воздухе (рис. 3.43). А на его старом месте построен новый мост.



Рис. 3.44. Мосты Франтишека Фалтуса

Третий участник этого заочного первенства, профессор Франтишек Фалтус преподавал в Школе сварщиков на заводе Шкода. В 1928 году он запроектировал, и под его руководством был изготовлен цельносварной мост пролетом 49,2 м. Мост был смонтирован в Пльзне над железной дорогой Пльзнь-Хеб и введен в эксплуатацию в 1931 году.

В 1930 году Фалтус начал проектирование цельносварного арочного моста пролетом 50,6 м через реку Радбужа около Пльзеня, этот мост построен в 1933 году и эксплуатируется до сегодняшнего дня.

В тридцатые годы строились и другие сварные мосты. По-видимому, самым первым цельносварным мостом в Великобритании был подъемный мост в Middlesborough, построенный в 1934 году (рис. 3.45), известны также мосты через канал Альберта в Бельгии. Один из них пролетом 74,5 м потерпел аварию и внезапно обрушился при отсутствии на нем расчетной нагрузки, в качестве причин обрушения были названы: применение хрупкой томасовской стали и значительные остаточные сварочные напряжения.



Рис. 3.45. Мост в Middlesborough

В конце 40-х годов в США профессор Эдвард Эштон (Edward L. Ashton), начавший работу над созданием цельносварного моста еще до войны, запроектировал цельносварной мост через реку Айова.

Этот мост, названный «Бентон стрит», имел пятипролетное неразрезное балочное пролетное строение общей длиной около 175 метров (рис. 3.46). Проект моста был закончен в 1947 году, мост сдан в эксплуатацию в 1949 году и исправно служил до 1989 года, когда был заменен более широким новым мостом.

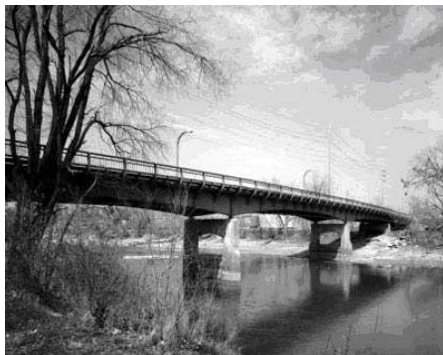


Рис. 3.46. Мост Бентон стрит

Ну а что же с мостом Патона?

Тут все не просто, и огромная заслуга Евгения Оскаровича состоит в нерушимой вере в сварку для мостостроения. Вере, позволившей преодолеть множество препятствий, вере (лучше сказать уверенности) в то, что к идее строительства большого цельносварного моста следует подходить со строго научных позиций. Дело в том, что сама идея сварного моста через Днепр была высказана Е.О. Патонов еще до войны. Тогда же против его смелой идеи вытеснить из мостостроения клёпаные мосты начались атаки. Главными доводом у работников Наркомата путей сообщения были ссылки на неудачный мировой опыт, в первую очередь, в Германии, США, Бельгии. В сварных мостах не могли избежать самого опасного — образования трещин усталости. И как раз к этому времени противники сварки мостов получили козырный контраргумент: в Бельгии в канал Альберта рухнул 75-метровый сварной пролёт моста, выполненного в форме балки Веринделя (рис. 3.47).

Всему этому была противопоставлена серия исследований, направленных на поиск подходящей стали и сварочных материалов, на отработку режимов сварки и других важных деталей. За действиями Патона предвзято наблюдали Главмостострой, Ленинградский НИИ мостов, Главстальконструкция, МПС. Проблема усугубляется тем, что 31 января 1951 года в Канаде рухнул построенный в 1948 году сварной пролёт моста в Дюплессис.



Рис. 3.47. Авария моста через канал Альберта

Ответные действия Е.О. Патона и коллектива Института электросварки заключались в последовательных шагах по внедрению сварки в мостостроение, с тщательной проверкой результатов и наблюдениями за поведением конструкций: создавалась новая марка стали, стойкая против образования хрупких и усталостных трещин, отработывалась технология ее сварки, подбирались сварочные материалы.

Одновременно в Киевской проектной конторе Проектстальконструкция (ныне Укринсталькон им. В.Н. Шимановського) шло проектирование моста. Для него была принята неразрезная балочная схема с двутавровыми балками большой высоты и рекордной тонкостенности. Пойменные пролеты имели размер 58 метров, главные речные пролеты — 87 метров. Была найдена конструкция монтажного стыка со вставками стенки и верхнего пояса, который допускал использование сварочных автоматов.

Мост смонтирован и сдан в эксплуатацию 5 ноября 1953 года, Евгений Оскарович не дожил до этого дня всего три месяца. Мост (рис. 3.39) справедливо назван его именем и должен быть представлен как **наибольший в Европе на момент строительства цельносварной мост, у которого впервые все швы, включая и монтажные, выполнены с помощью автоматической сварки**. Так будет справедливо и понятно специалисту, но не гидам, сопровождающим толпу зевак.



Рис. 3.48. Мост им. Е.О.Патона

Гиды (к сожалению, не только они) предпочитают говорить о первом в мире цельносварном мосте. Неправда, но зато какой пиар...

Разводные мосты

Существует еще один интересный класс мостовых сооружений. Они, в отличие от подавляющего числа других мостов, не являются статически замершими конструкциями, а могут менять свою конфигурацию. Такие мосты расположены над судоходными водными путями в местах, где оказывается невозможным или слишком дорогим решение, которое дает достаточное место для судоходного габарита.

Чаще всего решение состоит в создании некоторого разводного пролета, когда мостовое полотно переводится из горизонтального в вертикальное положение. Здесь требуется предусмотреть минимально возможный собственный вес, поскольку он уменьшает размер противовесов и мощность механизмов, с помощью которых можно открыть и закрыть раздвижной пролет.

Примером может служить мост Эразма через реку Маас в центре Роттердама (рис. 3.49) пролетом 280 м, построен в 1996 году по проекту Ben van Berkel. Мост имеет самый длинный (88 м) разводной пролет. Он построен по классической схеме, которая предусматривает поворот проезжей части вокруг горизонтальной оси. Такую систему имеют большинство разводных мостов, в частности все разводные

мосты Санкт Петербурга. Один из них (мост Лейтенанта Шмидта) показан на рис. 3.5.



Рис. 3.49. Мост Эразма

Однако имеются и другие конструктивные решения. Одно из них реализовано в Великобритании на мосту Ennerdale Bascule bridge и использует для подъема пантографическую систему (рис. 3.50). Здесь имеется пара расположенных параллельно пролетных строений для движения в прямом и обратном направлении. Каждое пролетное строение весит 400 тонн и имеет 300 тонный противовес.

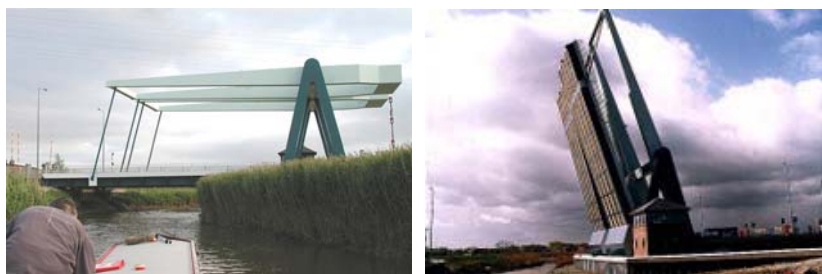


Рис. 3.50. Ennerdale Bascule bridge

Вантовый пешеходный мост в городе Нови-Сад (рис. 3.51) реализует систему поворота в плане вокруг вертикальной оси. Механический привод скрыт в центральном устое, и более короткий задний пролет содержит стальные противовесы в слитках. Вся система оказывается уравновешенной, что существенно сокращает требуемую мощность механизмов поворота.



Рис. 3.51. Мост в Нови-Саде

Поворотные системы не являются единственно возможными. Например, мост в Манчестере, и является мостом с вертикальным подъемом пролета. Шестисоттонная проезжая часть поднимается на 15 метров, чтобы позволить проход судов (рис. 3.52). Причиной для принятия такого решения была нехватка места в городской застройке для размещения подходов к мосту.



Рис. 3.52. Мост в Манчестере

Гейтсхедский Millenium Bridge возможно уникален в способе, которым он открывается. Будучи ни подъемным, ни поворотным, он открывается не вращаясь, а его движение было уподоблено миганию глаза. Этот пешеходный мост пролетом 125 м. связывает Гейтсхед с Ньюкаслем и включает пару арок (одна образует проезжую часть, а другая несущую систему), которые поворачиваются вокруг их общей опорной оси (рис. 3.53). Мост открывается системой гидравлических домкратов, размещенными в устоях.



Рис. 3.53. Гейтсхедский Millenium Bridge

Мост Yumetai в Японии (рис. 3.54) — арочный плавающий мост пролетом 410 метров, установленный на двух массивных понтонах (58×58×8 м). Эта конструкция открывается, поворачиваясь вокруг одного из концов моста на 90° в плане. Причиной использования плавающего моста низкого уровня были плохие инженерно-геологические условия, исключающие устройство расположенной высоко проезжей части.



Рис. 3.54. Плавающий мост Yumetai в Осака

Уроки аварий

Одна из возможных точек зрения сводится к тому, что история мостов, в сущности, представляет собой длинную вереницу катастроф. В истории техники не много других примеров, где конструктивное решение завоевывало свое право на жизнь и было оплачено столь дорогой ценой.

Аварии и крушения представляют собой незапланированный трагический эксперимент по проверке работы конструкции, доведенной до стадии истощения несущей способности или до разрушения. Здесь уместно привести слова Р. Стефенсона: «Нет ничего более по-

учительного для молодых инженеров, чем отчеты об авариях больших сооружений и о средствах, использованных для исправления повреждений. Добросовестное изложение этих происшествий и способов, которыми исправляли их последствия, имеют большую ценность, чем описание самых успешных работ».

К сожалению, несмотря на важность тщательного изучения причин аварий, не все они добросовестно освещались. Это объясняется тем, что правдивое описание причин аварий подорвало бы авторитет строящих фирм и нанесло бы им материальный ущерб. Однако, есть ряд в какой-то степени «ключевых» аварий, расследование которых самым серьезным образом расширило инженерные знания, продвинуло науку и практику. Ниже такие аварии представлены в хронологическом порядке.

Крушение Broughton Suspension Bridge. 12 апреля 1831 солдаты под командой лейтенанта Фитцджеральда (P. S. Fitzgerald) шли по мосту, по четыре в ряд и почувствовали, что мост начал вибрировать в такт с их шагами. Для развлечения некоторые из них начали насвистывать ритмически, заставляя мост вибрировать еще больше. Когда голова колонны почти достигла конца моста, один из железных пилонов, поддерживающих цепи, разрушился, и мост рухнул. Поскольку глубина в том месте невелика, ни один человек не погиб, но двадцать было ранено.

В результате инцидента в британских вооруженных силах появилось правило, что войска, пересекая мост, должны "идти не в ногу". Аналогичное правило в русской армии появилось после аварии Египетского моста в Петербурге, которая произошла 20 января 1905 года.

Крушение моста через реку Кевду. Крушение произошло в 1875 г. (вскоре после окончания сборки) при проходе по мосту рабочего поезда. Основная причина — потеря устойчивости верхних поясов ферм в плоскости, перпендикулярной плоскости ферм (рис. 3.55). Мост длиной 33,5 м не имел верхних горизонтальных связей. Верхний пояс ферм представлял собой сжатый длинный стержень, работающий в упругой среде, создаваемой отпором стоек. Недостаточная жесткость стоек оказывала незначительный отпор, и работа пояса проходила в неблагоприятных условиях.

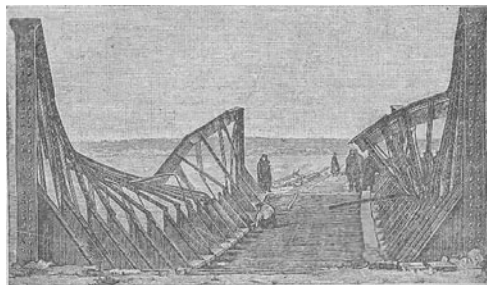


Рис. 3.55. Выпучивание верхнего пояса открытого моста

Современный расчет показывает, что фактическое напряжение в поясе 970 кг/см^2 значительно превышало критическое напряжение 850 кг/см^2 . Потеря устойчивости верхнего пояса открытых мостов обычно имеет смешанную изгибно-крутильную форму.

Эта авария впервые наглядно показала опасность продольного изгиба, и послужила толчком к развитию теории устойчивости — задача об устойчивости верхнего пояса открытого моста присутствует теперь в любой книге по устойчивости.

Крушение моста через реку Тэй. Крушение произошло 28 декабря 1879 г. через 19 месяцев после начала эксплуатации. Длина моста свыше 3,5 км, ширина 4,5 м. Мост имел 85 разных пролетов — от 8,54 до 74,7 м. Фермы с параллельными поясами (кроме одной с криволинейным верхним поясом) опирались на очень высокие решетчатые опоры, которые в свою очередь опирались на кирпичные быки, установленные на кессонах.

В сильную бурю (скорость ветра 36–39 м/с) тринадцать судоходных пролетов, перекрытых тремя неразрезными фермами (одной — пяти- и двух — четырехпролетными) с пролетами по 74,7 м, вместе с находящимся на них пассажирским поездом обрушились в воду.

Частично обрушились и металлические трубчатые опоры вплоть до каменной кладки (рис. 3.56). По свидетельству современников, подобной катастрофы еще не было в истории мостостроения Англии.

Мост имел 20-кратный запас прочности на вертикальную нагрузку и практически не был рассчитан на ветровую. Автором проекта была сделана проверка только на ветровую нагрузку на весьма заниженное давление — 47 кг/м^2 . Нормы для определения ветрового давления в разных странах были разные: в Англии при постройке Тэйского моста была взята нагрузка в 3 раза меньше, чем в Германии, и в 5 раз мень-

ше, чем в США. Итак, мост был проверен на давление ветра 47 кг/м^2 , а в момент катастрофы это давление достигало 100 кг/м^2 .



Рис. 3.56 Тейский мост

В результате крушения Тэйского моста была выявлена роль недоучета ветровой нагрузки, и возник вопрос о необходимости дополнительной проверки устойчивости на опрокидывание.

Авария Менхенштейнского моста через реку Бирс произошла 14 июня 1891 г. Однопутный мост длиной всего 42 м, построенный по проекту автора всемирно известной в Париже башни инженера Эйфеля, был расположен на магистрали, соединяющей Париж со Швейцарией.



Рис. 3.57. Авария Менхенштейнского моста

Фермы моста — с параллельными поясами. Высота ферм 6,2 м, расстояние между осями ферм 4,7 м. Материал — сварочное железо. За год до крушения мост уже подвергался усилению. Он обрушился во время прохождения по нему пассажирского поезда. Основная причина — потеря устойчивости средних раскосов вследствие недоста-

точной их жесткости. Знакопеременные раскосы были ошибочно рассчитаны и запроектированы как растянутые.

Свидетели аварии почти единогласно показали, что крушение началось в тот момент, когда паровоз еще не достиг середины или только что перешел за середину моста. Линия влияния указывает на то, что для среднего раскоса такое нагружение наиболее опасно, поскольку приводит к сжатию.

Еще одной из причин катастрофы было то, что вместо металла с прочностью 3200 кг/см^2 и пределом упругости 1500 кг/см^2 , требовавшегося по расчетам, применили материал с показателями соответственно 2600 кг/см^2 и 1000 кг/см^2 . Кроме того, места заклепочных соединений подсчитали брутто, без учета ослабляющих конструкцию отверстий

Авария показала важность соблюдения расчетной дисциплины и контроля качества материалов. Соответствующие указания были выпущены железнодорожными ведомствами во многих странах.

Авария Квебекского моста через р. Св. Лаврентия. Мост обрушивался дважды — первый раз 29 августа 1907 г. во время строительства, вторая катастрофа произошла 11 сентября 1916 г. во время монтажа конструкций при установке центрального подвесного пролета.

Первое крушение произошло в период, когда были выполнены южная половина моста и три панели подвесной фермы. Сборка производилась на весу двумя кранами, которые в момент крушения стояли на консолях фермы. Катастрофа уже наметилась почти за месяц до аварии — большие выгибы сжатых стержней консольных ферм. Возникшая по этому вопросу переписка между находившимся в Нью-Йорке автором проекта Теодором Купером (Theodore Cooper) и производителем работ Мак-Луре (R/ Mc Lure) затянулась до дня катастрофы. Причинами были сильно заниженная нагрузка от собственного веса и неправильно рассчитанный нижний сжатый пояс (составной стержень).



Рис. 3.58. Вторая Квебекская катастрофа

Теории расчета решетки составных стержней в то время еще не было. Неумение рассчитывать решетку составных стержней, работающих на продольный изгиб, сделало все сооружение дефектным. Кроме того, нижний сжатый пояс был еще не весь склепан, отдельные его элементы были соединены на временных болтах и не обеспечивали необходимой жесткости.

Продолжить работы, практически начав строительство заново, решился Рудольф Моджеевский (Ralph Modjeski). Но и он не избежал неудачи, второе крушение произошло через 9 лет, в момент установки центрального подвесного пролета длиной 187 м и весом 5200 т. Пролет обрушился внезапно, когда баржу, на которой покоилась ферма, оттянули, ферма повисла на подъемных цепях, с помощью которых ее подтягивали к консолям моста. В момент подъема из-за некоторого перекоса ферма соскользнула с одной из концевых опор и, оборвав подъемные устройства, упала в воду (рис. 3.52).

Квебекская катастрофа моста через реку св. Лаврентия (Канада) дала толчок к изучению устойчивости при продольном изгибе элементов составного сечения.

Авария Мозырского моста. Однопутный Мозырский мост через реку Припять после гражданской войны был восстановлен в 1922 г. В 1925 г. при испытании Мозырского моста поездом, дававшим совместно с неубранными подмостями нагрузку на пояса ферм 96,7 % от расчетной, а на раскосы – 89 %. 14 февраля, при надвигке поезда на первый пролет и при его приближении к невыгодному положению загрузки внезапно выпучились внутрь фермы два первых сжатых раскоса, деформация которых была остановлена зажатым ими последним вагоном (рис. 3.59). Раскосы потеряли устойчивость из плоскости ферм, и стрела прогиба составила для левого раскоса 90,5 см, а для правого – 146 см.

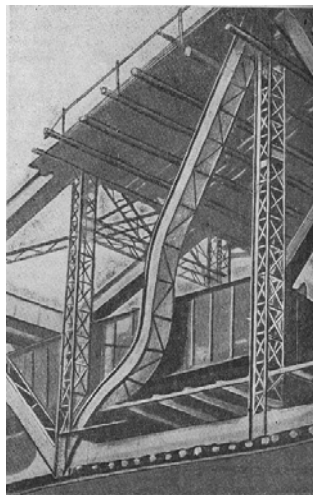


Рис. 3.59. Авария Мозырского моста

Ферма осела на сохранившиеся подмости, что сопровождалось толчком и резким треском от срезанных и падающих заклепок. Тщательное исследование аварии привело к выводу, что основной причиной ее возникновения явилось ослабление жесткости соединительной решетки раскосов. При расклепке и вторичной склепке элементов, естественно, увеличились заклепочные и болтовые отверстия, болты в конструкциях моста имели «игру», что создавало незначительную жесткость соединений.

Эта авария указала на принципиальную важность хорошего состояния решетки составного стержня — фактор, на который ранее обращали недостаточное внимание.

Обрушение моста через залив Такома. Крушение произошло 7 ноября 1940 г. после четырехмесячной эксплуатации. Основная причина аварии — чрезмерные динамические крутильные колебания, вызванные ветром. Для изучения аварии этого моста удачным фактором было то, что точное поведение моста от начала аварии до момента крушения удалось подробно изучить при помощи киносъемки, зарегистрировавшей колебания и характер разрушения.

Крушение произошло в 1940 г. после 4-х месячной эксплуатации в результате вызванных ветром динамических колебаний (аэродинамических). Обрыв подвесок центрального пролета повлек провисание боковых пролетов и наклон пилонов. На рис. 3.60 виден характер колебаний моста при скорости ветра 18,8 м/сек. Мост был запроекти-

рован и правильно рассчитан на действие статических нагрузок, в том числе и ветровой, но аэродинамическое действие нагрузки не было учтено.



Рис. 3.60. Такомская авария (кадры из фильма)

Крутильные колебания возникли в результате действия ветра на проезжую часть около горизонтальной оси, параллельной продольной оси моста. Крутильные колебания усиливались вертикальными колебаниями тросов. Опускание троса с одной стороны моста и поднятие его с другой вызвали наклон проезжей части и породили крутильные колебания.

Анализ происшествия с Такомским мостом дал исследователям больше, чем практический опыт всех предыдущих десятилетий. В настоящее время испытания модели моста в аэродинамической трубе являются обязательной фазой для каждого будущего висячего моста.

Можно было бы указать и на другие аварии, их достаточно подробный список представлен в Интернете на специальном сайте en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_failures. В этом списке имеются сведения о 152 авариях с мостами, о которых сообщалось в печати.

Очерк четвертый. ... И О КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ

В этом очерке приводятся разрозненные сведения о развитии металлических конструкций зданий различного назначения. Исключением являются каркасы высотных зданий, которым посвящен отдельный очерк.

Вновь, как и в очерке о мостах, мы рассматриваем какие-то отдельные вопросы, те вопросы, которые не очень широко представлены в обычных исторических обзорах. При этом не удастся соблюсти хронологический принцип изложения, и одни и те же периоды рассматриваются с точки зрения развития различных конструктивных форм.

Конструктивная форма номер два

Если двутавр является безусловным чемпионом среди простейших элементов металлических конструкций, то для конструкций составных и многоэлементных к чемпионам безусловно относятся фермы.

Фермы зародились в эпоху деревянного строительства, и металлические фермы являются наследниками многих инженерных находок той эпохи, более того, довольно долго существовал (в некотором смысле существует и сейчас) феномен металлодеревянной фермы. Поэтому начинать историю следует из далеких времен, когда камень и дерево были основными строительными материалами. Тогда же были построены деревянные конструкции с канатами, иногда выполнявшими роль растянутых элементов (вспомним корабельные мачты). Деревянные конструкции стропил, деревянные подмости для каменных арок и деревянные мосты по существу часто были фермами.

Известными сохранившимися примерами деревянных ферм шестнадцатого и семнадцатого столетий являются стропильные системы кровли галереи Уффици во Флоренции или Московского манежа (рис. 4.1).

Проект этих успешно существовавших деревянных конструкций по всей вероятности основывался на длительном процессе проб и ошибок. Но многие детали этих ферм говорят о том, что их создатели понимали смысл игры сил в конструкции, например, представляли, был ли некоторый стержень сжатым или растянутым (хотя и не могли бы вычислить величину этих сил).

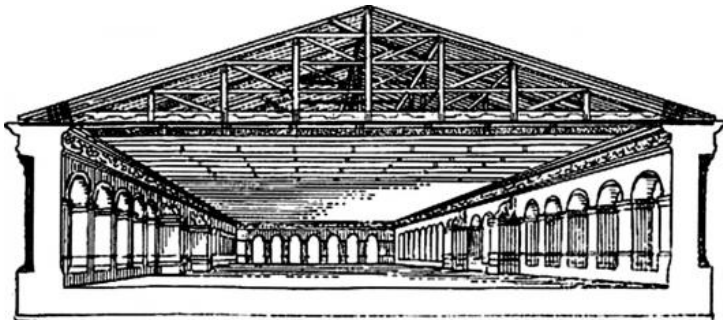


Рис. 4.1. Деревянное покрытие Московского манежа

Несмотря на то, что основные принципы расчета ферм были определены в значительной степени в семнадцатом и восемнадцатом столетиях, что возможно лучше всего иллюстрируется работой Лагранжа «Аналитическая механика», изданной в 1787 году, все же представляется, что принципы механики были применены к расчету ферм лишь в девятнадцатом столетии.

В лекциях Навье, прочитанных в парижской школе дорог и мостов и изданных в 1826 году, дано явное решение для определения сил в простой треугольной ферме, названной "королевской стойкой", если к паре наклонных стержней добавлялся вертикальный. Кроме того, Навье определяет усилия в поясах, рассматривая ферму с параллельными поясами как балку с жесткостью, пропорциональной площади поясов, умноженной на квадрат расстояния между ними.

Работам Журавского (1845), Шведлера (1851), Кульмана (1851), Риттера (1862), Максвелла (1864) и Кремоны (1872), без которых сегодняшний инженер не представляет себе возможность расчета фермы, еще предстояло появиться, когда началось реальное строительство металлических ферм. Итак, опираясь на опыт, накопленный при строительстве деревянных конструкций, и на основе достаточно приблизительных представлений о работе ферм, возводились первые сооружения в металле. В Париже некоторые сооружения были известны еще перед Великой французской революцией, как, например, крыша с пролетом 21 метр над Королевским театром, построенная в

1786 году (рис. 4.2). В этой крыше, как и в других случаях, конструктивная логика в целом не ясна, и металл скорее использовался как элемент украшения, чем выступал в роли несущей системы.

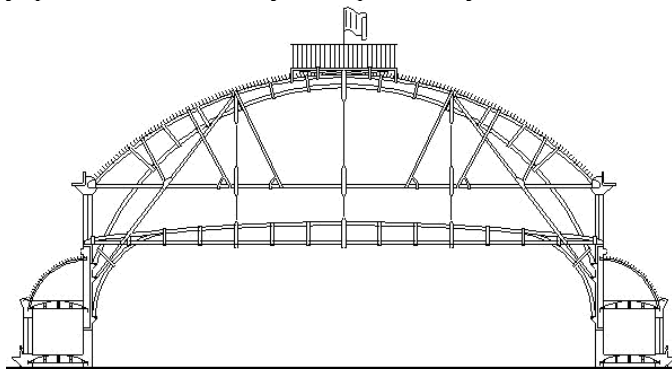


Рис. 4.2. Покрытие Королевского театра

В 1831 г. закончена установка последних трехъярусных стропильных конструкций пролетами 21, 22 и 30 м из чугуна и железа над сценой и зрительным залом Александрийского (ныне имени А. С. Пушкина) театра в Петербурге. Проект этого покрытия первоначально едва не был забракован¹, но осуществлен после испытания специальной комиссией исполненных конструкций на заводе. Каждый член комиссии обязан был выбить на конструкциях после их испытания личное специально изготовленное клеймо. Где уж тут до инженерного анализа работы ферм.

Даже в построенных значительно позже (1837 год) фермах кровли Зимнего дворца в Санкт Петербурге, фермах, собранных из квадратных, круглых и полосовых элементов из сварочного железа, современного инженера удивит отсутствие расколов (рис. 4.3). Эти расколы уже имеются в запатентованной в том же 1837 году ферме Полонсо. С нее следовало бы начинать период бурного роста предложений по различного рода конструктивным решениям ферм.

¹ Когда возникли сомнения в прочности ферм, автор проекта К.И.Росси написал министру двора письмо, где было сказано «...«Как я, так и г-н Кларк (директор чугунолитейного завода — А.П.), отвечаем честью и головой, что от упомянутой крыши не произойдет ни малейшего несчастья и что все устройство будет иметь надлежащую прочность... В случае, когда бы в упомянутом здании от устройства металлических крыш произошло какое-нибудь несчастье, то в пример для других пусть тот же час повесят меня на одной из стропил театра...». Аргумент серьезный, но с некоторой долей лукавства — ведь если бы крыша обвалилась, то не было бы той стропилины, на которой его должны были повесить.

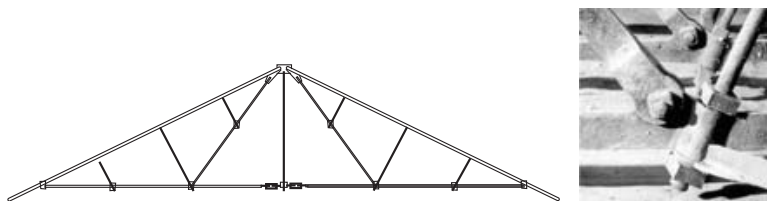


Рис. 4.3. Покрытие Зимнего дворца (схема и узел)

Камилл Полонсо (Camille Polonceau) запатентовал свою ферму в 1837 году и использовал ее на крышах зданий, построенных для железной дороги от Парижа до Версаля [53]. Дерево или чугун использовались для сжатых элементов, а сварочное железо — для растянутых стержней. По этой схеме строились серьезные сооружения, так проект, выполненный инженером Флеше (Flachat) для вокзала Монпарнас в Париже и реализованный в 1850-52 годах, использовал металлические фермы Полонсо для пролета 40 метров.

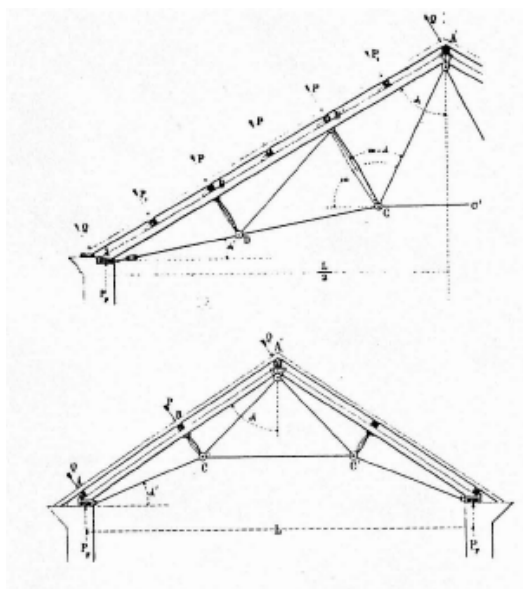


Рис. 4.4. Рисунки из патента Полонсо

Схема Полонсо использовалась также в Великобритании, в частности для крыши Бирмингемской станции железной дороги Бирмингема – Дерби. (Ферма Полонсо известна в Соединенных Штатах как ферма Финка, в честь немецко-американского инженера А.Финка (Albert

Fink), несмотря на то, что она использовалась и во Франции и в Великобритании раньше, чем Финк закончил в 1848 году Дармштадтский Политехникум). На авторство этой системы претендуют и немецкие исследователи. Так, М. Ферстер считает, что такая ферма была одновременно предложена Вигманом, и предлагает называть ее фермой «Вигман — Полонсо».

Долгое время верхний пояс фермы Полонсо выполнялся в дереве, но и переход к полностью металлической ферме некоторое время еще сохранял черты деревянной конструкции. Эта «наследственная болезнь» прошла не сразу. Привычная сейчас конструкция из парных уголков с фасонными узлами заняла господствующее положение, по-видимому, лишь в 80-х годах XIX века, но еще в 1879 году мы, например, сталкиваемся с другими конструктивными решениями ферм (рис. 4.5).

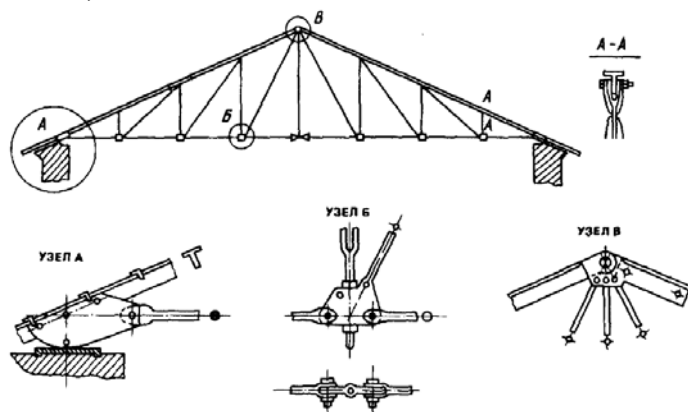


Рис. 4.5. Металлическая ферма

В качестве стропильных ферм использовались схемы Пратта с растянутыми диагоналями и Гау с растянутыми стойками, а также схема Уоррена, у которой сжатый элемент решетки был перпендикулярен верхнему поясу. Конструкторская традиция сложилась таким образом, что упомянутые схемы использовались в различных странах Европы и даже получили соответствующие названия: немецкая, английская и бельгийская ферма (рис. 4.6).

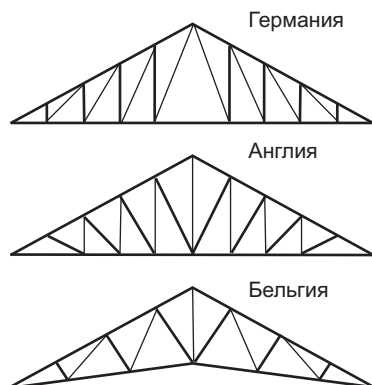


Рис. 4.6. Стропильные фермы

Возможности металлических конструкций приводили к постепенному увеличению используемых пролетов. Так, в 50-е годы фермой Полонсо перекрывается пролет 52 метра в покрытии вокзала в Марселе.

Большие пролеты

Кульминационным моментом в строительстве металлических покрытий было сооружение в 1851 году «Хрустального дворца» в Лондоне. Практически одновременно начинается стройка станции «Кинг-кросс» в Лондоне, Восточного вокзала в Париже и ряда больших железнодорожных сооружений — стальных сводчатых покрытий перронов — в 1866г. В Лондоне (станция «Панкрас») был установлен европейский рекорд — возведен 78-метровый пролет покрытия перрона (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Перрон станции Панкрас

К 1860 г. первое место в строительстве покрытий больших пролетов занимала Франция. В итоге парижских всемирных выставок 1855, 1867 и 1878 годов был достигнут еще один рекорд в сооружении стального трехшарнирного свода — свода Дворца машин (1889 г.) пролетом 110 м.

Дворец машин представлял собой самое большое в то время по пролету сооружение, перекрывающее огромную площадь выставочного помещения размерами 421×145 м. Авторами его проекта были архитектор М. Дютер и инженер М. Контансэн.

Дворец машин по ширине разделялся на три пролета: главный зал шириной 115 м и две галереи шириной по 15 м. Главный зал был перекрыт двадцатью пологими трехшарнирными арками, имеющими расстояние между центрами опорных шарниров 110,6 и высоту от пола до оси промежуточного шарнира 45 м (рис. 4.8,а); расстояние между торцовыми арками и смежными равнялось 25,3, между двумя средними — 26,4, а между остальными шестнадцатью арками — по 21,5 м. Арки решетчатые, спаренные; высота поперечного сечения их в верхней части — 3000 и в вертикальной — 3700 мм; расстояние между косынками спаренных арок 540 мм, а наибольшая ширина общего пояса, состоящего из пакета листов, доходит до 900 мм.

Этот зал, пожалуй, более внушительный из построенных когда-либо, возможно не был бы снесен в 1910 году, если бы его не затмила Эйфелева башня, которая, будучи на первых порах очень спорной, стала знаменем времени и способствовала формированию нового восприятия пространства и структуры живописцами и конструкторами. Но в этот период стальные конструкции все же не нашли очень широкого применения. Преклонение перед историческими архитектурными формами долгое время препятствовало развитию новейших архитектурных форм, ставшему неизбежным по мере того, как с применением стали в качестве несущего строительного материала старые догмы строительной науки и старые типы конструкций подверглись коренному пересмотру.

Разделение старой строительной профессии, выделение инженера в самостоятельную профессиональную единицу, появление современной статки сооружений — все это вместе с первыми шагами индустриальной революции стало важнейшим признаком новой эры в строительном деле. Архитекторы продолжали использовать исторические строительные формы, и это стало предпосылкой сотворения монументальной архитектуры, а промышленное строительство было оставлено инженерам. Первые сооружения из стальных конструкций — мосты и большепролетные залы — стали объектами деятельности

лишь инженеров-строителей. Инженеры тоже находились под влиянием старых представлений о конструктивных формах, так как упорно применяли сводчатые конструкции.

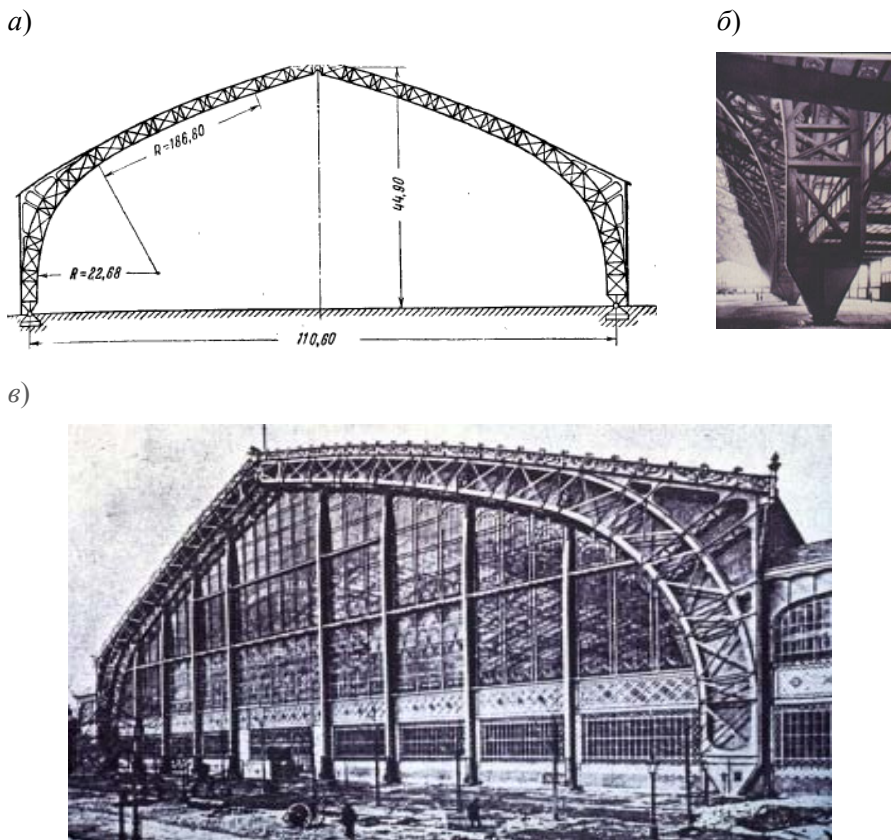


Рис. 4.9. Дворец машин: *а* — схема, *б* — опорный узел, *в* — общий вид

Успех фермы Полонсо не в последнюю очередь связан с формой ее нижнего пояса, которая позволяла повысить высоту помещения в середине пролета, что создавало благоприятное зрительное впечатление. Само стремление к такому эффекту породило конструкцию фермы с дугообразным нижним поясом, что часто использовалось в общественных зданиях, в особенности в тех случаях, когда конструкция оставалась открытой. По внешнему рисунку такие фермы похожи на арочные, но работают они по безраспорной, балочной схеме. Типичный пример, относящийся к 1893 году приведен на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Биржа в Амстердаме. арх. Берлаге.

Аналогичные конструкции с аркоподобными фермами использовались и в промышленных зданиях конца XIX начала XX века. Примером может служить механосборочная мастерская Балтийского судостроительного завода (1890). Она помещалась в четырехпролетном здании с прямоугольным планом размером 200×46 м (рис. 4.10). Центральный пролет длиной 15 м перекрывался металлическими решетчатыми рамами с двухскатным верхним поясом и криволинейным нижним. Остальные пролеты перекрывались односкатными треугольными фермами.

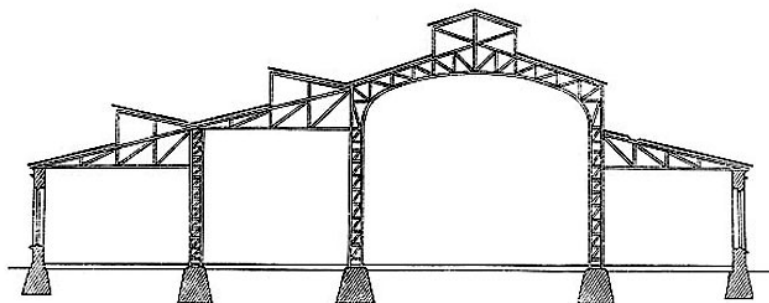


Рис. 4.10. Механосборочная мастерская

Оригинальные стропильные системы в виде арки с веерными затяжками были предложены В.Г.Шуховым, который выполнил их детальный анализ [30]. Они были успешно использованы в покрытиях многих сооружений, например, над торговыми галереями ГУМ в Москве или над главным залом музея им. Пушкина (рис. 4.9).



Рис. 4.11. Покрытие Пушкинского музея, 1912 г

Построенные в конце XIX века большепролетные здания, такие как Галерея машин — пролет 110 м (1889 г), здание отдела мануфактуры на всемирной выставке в Чикаго — пролет 112,16 м (1892 г), покрытие вокзала в Филадельфии — пролет 94,18 м (1895 г) и др. могли бы, в принципе, иметь и меньшие пролеты. Их размеры не были жестко связаны с функциональным назначением.

Но после первой мировой войны появилась потребность в больших пролетах для решения сугубо функциональных задач. Это были эллинги для дирижаблей, огромные габариты которых требовали соответствующих пролетов и высот здания (рис. 4.12).

Большинство первых дирижаблей использовали водород, следовательно, их эллинги были обязаны защищать горючий газ от возможного взрыва. Эллинги, которые хранили несколько дирижаблей этого типа, были связаны с большим риском взрыва, по этой причине эллинги проектировались под один (редко под пару) дирижаблей.



Рис. 4.12. Вывод и ввод дирижабля в эллинг

В Англии построили эллинг в Кардингтоне, громадный по тому времен эллинг в Карачи (Индия) был построен длиной 255, шириной 60 и высотой 51 м. В США был сооружен эллинг в Лекхерсте длиной 243, шириной 79,6 и высотой 51,6 м.

В Германии были построены эллинги в Зеддине длиной 242, шириной 60 и высотой 35 м (рис. 4.13) и в Альхорне длиной 260, шири-

ной 75 и высотой 36 м. Оба эллинга представляют собой арочные конструкции. Отдельные части арочных ферм были изготовлены на заводе, и в готовом виде доставлены к месту монтажа.

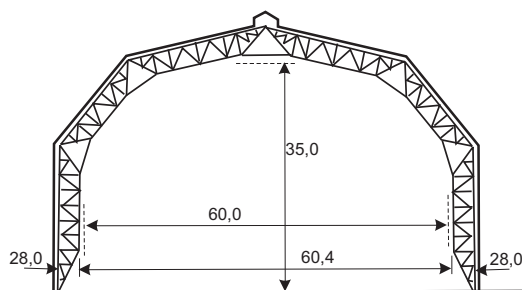


Рис. 4.13. Эллинг в Альхорне

Необходимость полного раскрытия внутреннего пространства для ввода или вывода дирижабля потребовала решения проблемы огромных ворот. Чаще всего они проектировались в виде раздвижных систем, с плоскими створками на металлическом каркасе (рис. 4.14, а) и располагались на обоих торцах здания. Но построенные в 1928-1932 годах эллинги в Акроне (США, штат Охайо — ширина 99,04 м, высота 60,5 м, длина 362 м) и Сенинвейле (США, район Сан-Франциско — ширина 93,5 м, высота 50 м, длина 338 м) имели ворота нового типа в виде обтекаемых конструкций двойной кривизны (рис. 4.14.б), створки которой двигались по круговому рельсу.

а)



б)

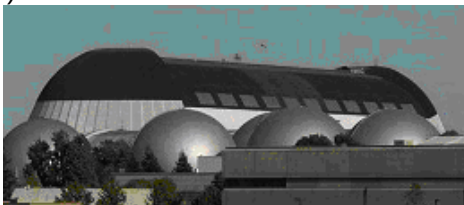


Рис. 4.14. Ворота эллингов

Многие из найденных в то время конструктивных решений нашли свое развитие во второй половине XX века, когда понадобилось строить большепролетные ангары для самолетов.

Становление схемы производственного здания

Первые шаги на пути применения металлических конструкций в строительстве производственных зданий были сделаны в Англии применительно к многоэтажным постройкам ткацкого производства.

С целью выиграть рабочую площадь и получить более прочные перекрытия для станков деревянные колонны (столбы) были заменены чугунными и деревянные балки — металлическими. Самым известным зданием из первых промышленных многоэтажных сооружений было здание, построенное в 1801 г. для компании «Филипп и Ли» в Салфорде (Манчестер). Проект принадлежал Боултону и Уатту, изобретателю паровой машины. Подобные текстильные фабрики с внутренним металлическим каркасом возникли уже в 80-х годах XVIII в. Но здание в Салфорде превзошло их как размерами, так и более зрелым конструктивным решением и стало прототипом для дальнейшего развития. Здание имело длину 42 м, ширину 14 м и было необыкновенной для того времени высоты — в семь этажей. Чугунные балки, расположенные с шагом $\sim 2,7$ м, были оперты на двойной ряд металлических колонн. Балки перекрытий, в первый раз принятые двутаврового профиля, поддерживали пологие кирпичные своды.

Существенное изменение претерпела эта конструкция только в 1845 г., когда Вильям Фэйрбэйрн применил на строительстве сахарорафинадного завода вместо чугунных балок кованые балки двутаврового профиля. В том же году А. Цорес включил прокатную двутавровую балку в конструкцию перекрытия для жилых зданий. Начиная с этого момента стальные балки стали распространяться не только в промышленном строительстве.

Созданный Боултоном и Уаттом «способ балочного строительства» господствовал в промышленном строительстве на протяжении всего XIX века. Внешняя каменная кладка и внутренне тонкие колонны из чугуна, поддерживающие чугунные прогоны, — эта комбинация стала общей формой в Великобритании для индустриальных зданий. На рис. 4.15 показан интерьер такого здания, построенного в 1845 году и недавно отреставрированного для использования в качестве кафе.



Рис. 4.15. Старинное здание с чугунными колоннами и балками

Но это еще не были здания, решенные в металлических конструкциях, так как огромную долю нагрузки от перекрытия и ветровые перегрузки воспринимали несущие стены.

Следующим шагом внедрения металлического каркаса было использование металла для стропильных конструкций. Сперва они напоминали деревянные стропила, но уже в 1836 году, так называемая, «английская модель треугольных покрытий» была использована для залов ожидания пассажиров на станции Лондонско-Бирмингемской железной дороги.

На рис. 4.16 показан чертеж несколько улучшенной системы, которая была применена в Берлине для локомотивного депо Borsig в 1856 году.

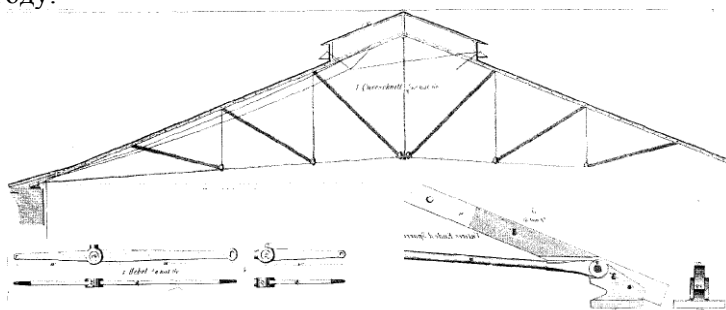


Рис. 4.16. Стропильная ферма локомотивного депо

Одной из первых попыток приближения к современному каркасному строительству является внедрение стальных перемычек и стоек, которые впервые были применены в Париже для больших витрин на фасадах зданий и имели вид пологого арочного фахверка, включенного в каменную стену. Вскоре был сделан и следующий шаг на пути к

стальному каркасу — передача нагрузок с наружной стены на металлический несущий остов.

Между 1850-м и 1880-м годами в Европе и в США было построено много складов, универсальных магазинов и разных контор, в которых фасады были полностью выполнены из стальных конструкций.

Использование раскосных связей сделало конструкцию независимой от каменной кладки стен для обеспечения жесткости каркаса. Это дало возможность использования в конструкциях стен других материалов, в частности рифленого железа. Рифленое железо, предок сегодняшнего волнистого стального листа, было запатентовано в 1829 году. Это было идеей Генри Робинсона Палмера (Palmer). Рифленые листы были впервые использованы при строительстве складских зданий в лондонских доках. Одно из них, сохранившееся до недавнего времени, показано на рис. 4.17.

Комбинация стального каркаса и легкого ограждения стала популярным решением для промышленных зданий. Многие из таких конструктивных форм в дальнейшем развивались, но уже применительно к зданиям определенных отраслей промышленности.

Особенностью строительства промышленных зданий во второй половине XIX в. является их более тесная связь с технологией производства. Применение паровых машин и переход в конце века к электрическим двигателям требовали приспособленности зданий к этим энергетическим установкам. Если паровая двигательная энергия шла к станкам через трансмиссии, нагрузка от которых передавалась вначале на специальные конструкции, а затем на строительные конструкции зданий, то применение электродвигателей привело к созданию мостовых электрических кранов, значительная нагрузка от которых также передавалась на строительные конструкции. В связи с этим менялся характер промышленных зданий.



Рис. 4.17. Складское здание с ограждениями из рифленого железа

Первый мостовой кран был построен в начале XIX столетия в Париже целиком из дерева. В 20-х гг. XIX века появились первые цельнометаллические подъёмные краны сначала с ручным, а в 1830 годах — с механическим приводом. Первый паровой подъёмный кран создан в Великобритании в 1830 году, гидравлический — там же в 1847 г. Двигатель внутреннего сгорания был использован в подъёмном кране в 1895 г., а электрический двигатель в 1880—1885 гг. почти одновременно в США и Германии. Это были мостовые краны с одномоторным приводом. В 1890 созданы подъёмные краны с многомоторным индивидуальным приводом в США и Германии.

Появление электрических мостовых кранов не сразу повлияло на конструктивную форму цехов, поскольку краны ставились на специальные эстакады.

Подкрановые балки стали располагать на металлических колоннах в начале XX века, так появилась поперечная рама, и это стало толчком для изменения конструкций промышленных зданий, которые стали значительно отличаться от гражданских.

Одним из первых крановых зданий является построенное в 1991 году трехпролетное здание механического цеха в Берлине (рис. 4.18). Здание имеет светоаэрационный фонарь в среднем пролете. Подобные фонари в виде остекленной части крыши нашли себе широкое применение в конце XIX века.

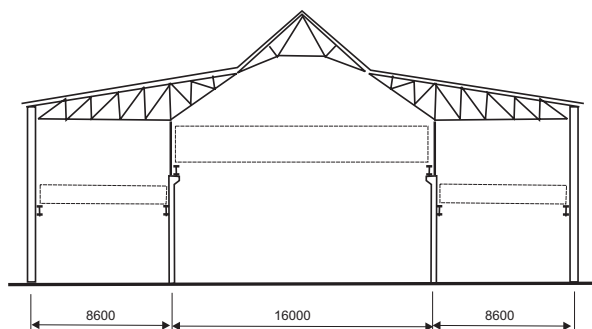


Рис. 4.18 Здание с мостовыми кранами

Характерным примером внедрения мостовых кранов может служить металлургическое производство. Здесь здания мартеновских цехов сначала обслуживались путевыми наземными паровыми кранами, перемещавшимися вдоль цеха и определявшими характер конструкции цеха.

Новая технология производства и увеличение емкости печей вызвали необходимость оборудования цехов мостовыми электрически-

ми кранами. Грузоподъемность мостовых кранов зависела от производительности печей. Конструкция кранов влияла на габариты цеха; с ростом производительности печей, разливочных ковшей и грузоподъемности кранов увеличивалась и высота здания. Ширина пролетов увеличивалась медленно, она зависела от пролетов мостовых кранов. Шаг колонн мартеновских цехов увеличивался с увеличением размеров печей и регенераторов. С установкой мостовых электрических кранов сформировался определенный тип мартеновского цеха с печным и разливочным пролетами, с печами между колоннами среднего ряда.

Таким был мартеновский цех Днепровского завода (рис. 4.19), пущенный в 1897 году [1]. В цехе помещались три мартеновские печи производительностью по 35 тонн. Здание пролетом 37 м было перекрыто фермой типа Полонсо, одна опора неподвижная, с анкерами, заделанными в стену, другая — подвижная, на катках. Решетчатые колонны в центре здания делили цех на два пролета — печной и разливочный — и служили опорой для подкрановых балок.

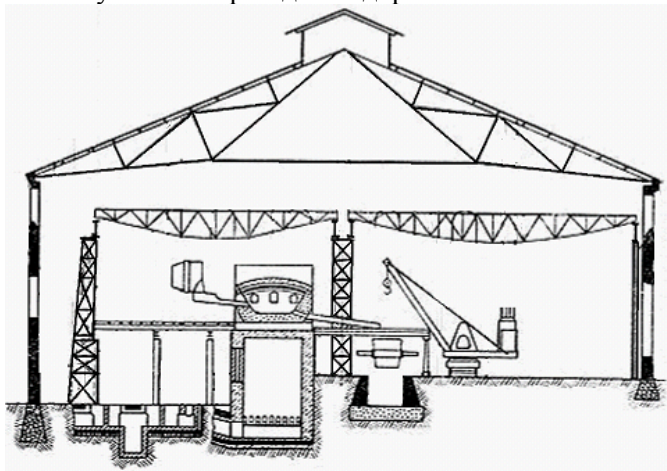


Рис. 4.19. Мартеновский цех Днепровского завода Южнорусского металлургического общества

Ковши для разливки стали употреблялись подвесные и на тележках. Они перемещались 40-тонным краном. В разливочном пролете имелись еще два 10-тонных мостовых крана. Для заливки чугуна в печь применялся 50-тонный электрический мостовой кран пролетом 14,5 м, который подвозил ковш с чугуном к печам и поднимал его на требуемую высоту. Мостовые краны опирались на стальные подкрановые балки.

Крановая эстакада, отделенная от каркаса здания использовалась достаточно широко в зданиях 90-х годов в Европе. По такой схеме В.Г.Шухов запроектировал здание колесолистопрокатного цеха Выксунского металлургического завода (1897), листопрокатного цеха Нижнетагильского металлургического завода (1903) и прокатного цеха №2 Златоустовского металлургического завода (1916).

К зданиям такого стиля, уникальным для европейской практики того времени, относится башенная мастерская Путиловского завода. Она построена в 1912 г. по проекту В.Г.Шухова и представляет собой трехпролетное здание (рис. 4.20). Нагрузку от кранов принимают на себя решетчатые колонны сложной конструкции с выступами и консолями. В середине пролета 10-тонный кран размещен на высоте 22,9 м; нижний - 70-тонный кран - на высоте 15,8 м. Установка двухъярусных кранов явилась в то время техническим новшеством, и конструкция колонн и подкрановых балок для них была также новым решением.

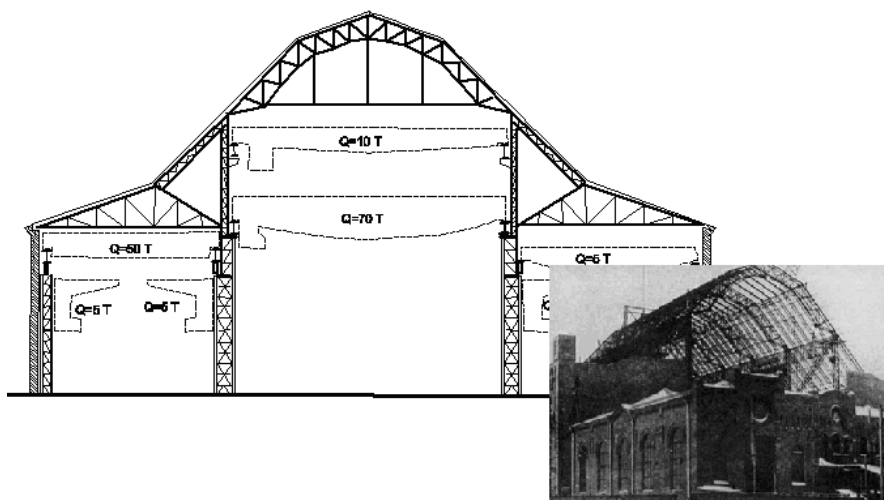


Рис. 4.20. Башенный цех Путиловского завода

Здание башенной мастерской, сохранившееся в основном до настоящего времени, было увеличено в длину на 70,8 м и в ширину на 27,41 м пристройками — железобетонной и кирпичной, с металлическим каркасом и металлическими колоннами

В приведенном выше примере колонны крайних рядов не связаны с наружными стенами и представляют собой самостоятельную конструкцию, несущую крановую нагрузку. Но уже стали появляться решения, где нагрузка от кровли передавалась на колонны, а не на

внешние стены, как в здании турбинного завода в Берлине, запроектированного Питером Беренсом (Peter Behrens) и построенного в 1909 году (рис. 4.21).

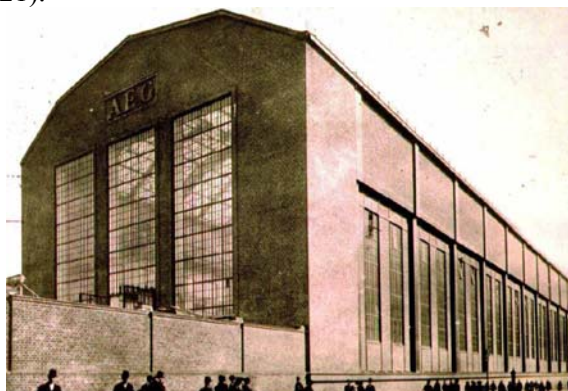


Рис. 4.21. Сборочный цех турбинного завода компании AEG

Арочное покрытие здесь шарнирно оперто на колонны, т.е. это еще не полностью здание «жесткого поперечника», они стали практическим стандартом не только в США, но и во всем мире несколько позже, уже после первой мировой войны.

Статическая схема европейских производственных зданий того времени включала в себя много шарнирных соединений, что по мнению инженеров того времени (главным образом, немецких) обеспечивало «ясность работы» конструкций. Основным несущим элементом каркаса становится несущая поперечная рама, включающая в себя колонны и сквозные ригели, которые играют роль стропильных ферм (рис. 4.22).

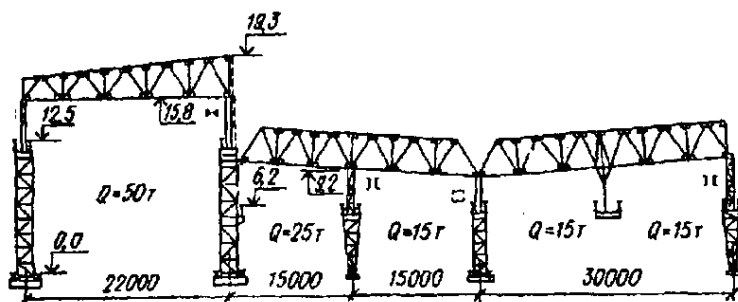


Рис. 4.22. Каркас производственного здания начала XX века

В США, где в отличие от Европы, стремившейся в первую очередь к экономии металла, развивалась концепция проектирования, ориен-

тированная на использование конструкций с максимально возможной скоростью возведения. Эта концепция тоже привела к идее, так называемого «жесткого поперечника», где подкрановые балки опирались на колонны, и при этом использовались жесткие сопряжения колонн с фундаментами и ригелями.

В первой половине XX века выделилось два центра формообразования объектов промышленной архитектуры — западноевропейские страны (особенно Германия) и США. Два разных подхода привели к одному результату — сложились практически сегодняшняя форма производственных объектов и новое конструкторское мировоззрение, архитектурная стилистика которого получила название Интернационального стиля.

Ярким представителем такого подхода в промышленном проектировании становится архитектор Альберт Кан, чья фирма Albert Kahn Associates Incorporated плодотворно сотрудничала с Генри Фордом, и это привело к созданию эффективного здания для массового производства. Стремление Г. Форда собрать все технологические операции на одной площадке, осуществить процесс сборки под одной крышей, использовать новую организацию труда, а главное — наладить серийный выпуск не штучной, а массовой продукции, находят воплощение в постройках автомобильных заводов. Альберт Кан был известен в Америке как «архитектор Форда», потому что спроектировал для фордовского концерна практически все заводы (рис. 4.23).

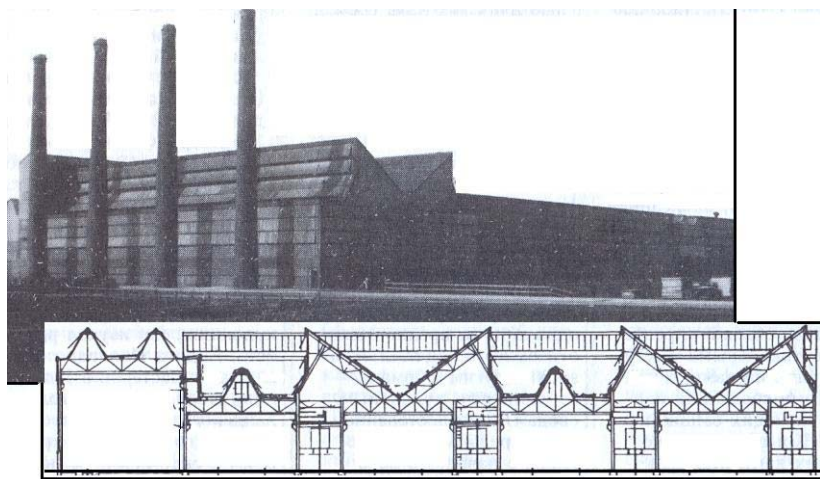


Рис. 4.23. Танковый завод Форда в Детройте

Альберт Кан работал и на других заказчиков, в частности, на автомобильную компанию Крайслер, для которой его фирма запроектировала здание экспортного центра (рис. 4.24).



Рис. 4.24. Экспортный центр Chrysler Half Ton, 1937

Однако, самым большим достижением в этой коллекции конструкций стало здание сборочного цеха авиакомпания Glenn Martin в Балтиморе (1937), где было создано свободное от колонн пространство 500 футов на 330 футов (152,4×100,6 м). Оно перекрыто фермами, у которых нижние пояса поочередно соединены с верхними поясами соседних ферм (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Здание сборочного цеха авиакомпания Glenn Martin

Вообще, фирма А. Кана запроектировала около 2000 заводов, объем ее работ составил в 1938 году 19% всех проектных работ США. В 1930-х годах фирма консультировала советских проектировщиков. В результате за два года в Советской России был построен 521 завод, в том числе Сталинградский тракторный (танковый). Завод был своевременно запроектирован и построен под Чикаго, после чего его ра-

зобрали, перевезли в СССР и смонтировали на том месте, где он стоит и сейчас.

Конструктивные схемы зданий, построенных в 30-е годы, несут на себе четкий отпечаток американского стиля конструирования, ориентированного на жесткий каркас. Именно этот стиль определил в нашей стране основное направление развития металлических конструкций на многие годы, когда в металле сооружались, главным образом, здания металлургической промышленности и тяжелого машиностроения.

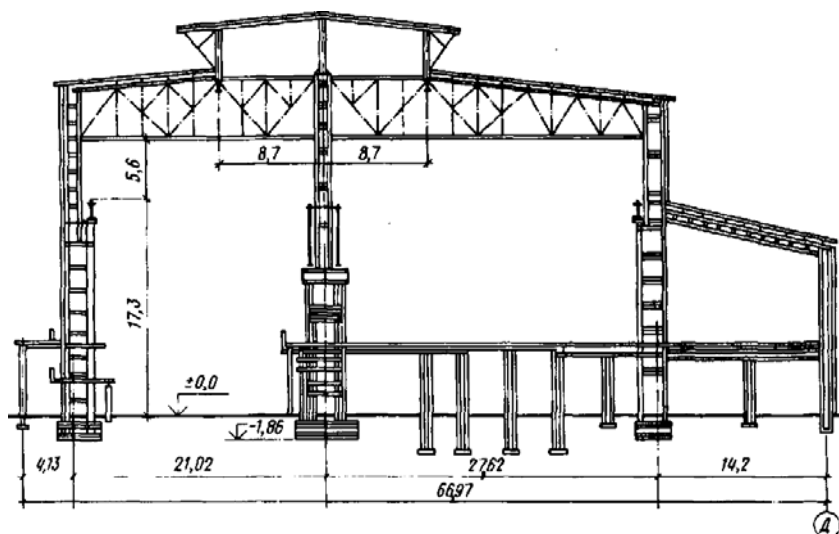


Рис. 4.26. Мартеновский цех Азовстали, 1932 год

Весьма характерным примером могут служить стальные каркасы мартеновских цехов (рис. 4.26), для которых весьма сложной проблемой было создание подкрановых конструкций по среднему ряду колонн. Большой пролет, обусловленный габаритами мартеновской печи, и внушительная грузоподъемность разливочных кранов потребовали создания специальной подкраново-подстропильной системы (рис. 4.27), которая была впервые применена по предложению Н.П. Мельникова в 1936 году при строительстве главного здания мартеновского цеха на заводе им. Дзержинского.



Рис. 4.27. Подкраново-подстропильная ферма

Позже эта конструктивная форма использовалась и в других тяжелых каркасах. Например, для мартеновского цеха с печами емкостью 900-1000 тонн пролет подкраново-подстропильной фермы составил 42 м, а грузоподъемность кранов — 630 т. Нижний пояс такой фермы (собственно подкрановая балка) это коробчатая конструкция размером 2,3×3,0 м.

Изучение промышленных зданий показывает, что, несмотря на некоторое сходство, они, тем не менее, всегда строились по-разному. До конца XIX в. в промышленном строительстве не возводилось одинаковых по размерам, материалам и конструкциям зданий. Типовые промышленные здания возникли лишь в конце XIX в.

Вместе с тем в каждой отрасли промышленности постепенно появлялись свои характерные черты производственных зданий. Вырабатывались определенные формы больших и малых промышленных зданий, типичными примерами могут служить здание кислородно-конвертерного цеха (рис. 4.28) или многоэтажное здание главного корпуса флотационной обогатительной фабрики (рис. 4.29).

Развивались и другие типы сооружений в металле, использование которых было вызвано требованиями производства (конвейерные галереи, крановые эстакады, открытые этажерки химических аппаратов и др.). Но при этом отрабатывались и некоторые общие приемы конструирования повторяющихся в различных условиях частей конструктивного комплекса. Типичным примером здесь может служить купол Шведлера.

Первый купол Шведлера, сооруженный в Берлине над газгольдерным зданием в 1863 г., имел диаметр 30,91 и высоту 3,86 м. При наполнении газгольдера газом колокол и его телескопы поднимаются вверх. Высота здания, в котором помещен газгольдер, зависит от наивысшего положения колокола при его подъеме и от внутреннего габарита покрытия.

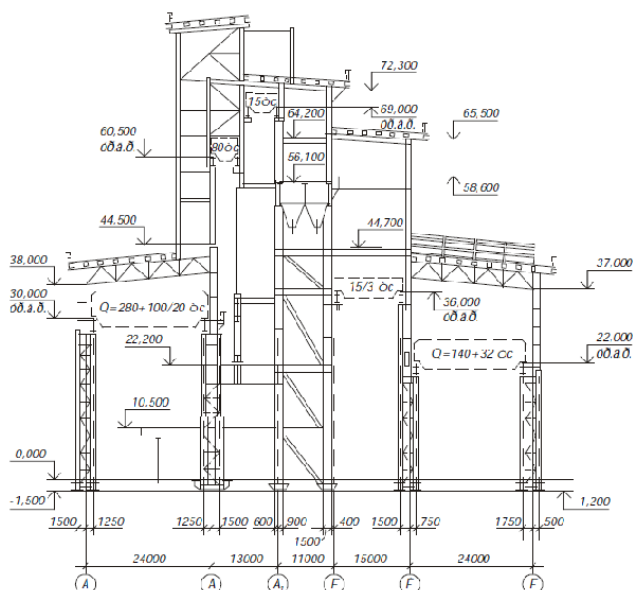


Рис. 4.28. Главное здание кислородно-конвертерного цеха

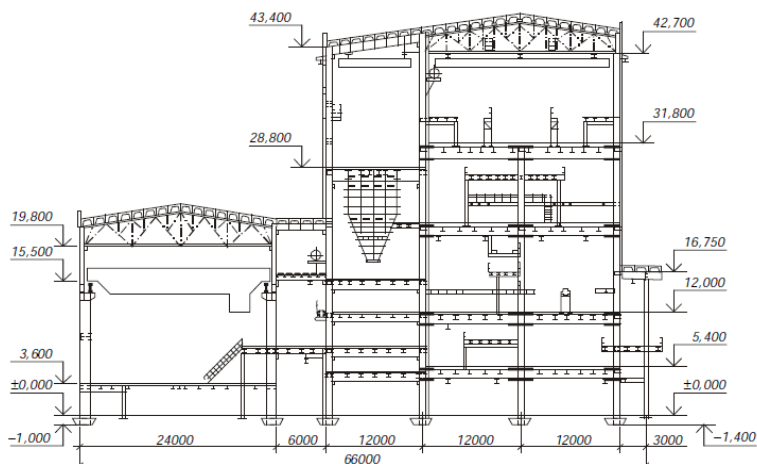


Рис. 4.29. Здание главного корпуса флотационной обогатительной фабрики

Если здание газгольдера покрыть куполом Шведлера, стержни которого расположены по его поверхности, то стены здания можно сде-

лать на несколько метров ниже, чем при покрытии этого здания радиальными фермами с нижними горизонтальными поясами. Это дает экономию средств на сооружение здания газгольдера, а также экономию при его эксплуатации, учитывая значительное уменьшение охлаждающих поверхностей за счет уменьшения высоты стен.

Эти достоинства купола Шведлера привели к его широкому применению для покрытий не только зданий газгольдеров, но и зданий других назначений, имеющих в плане форму круга или правильного многоугольника, как то: паровозных депо, цирков, панорам, выставочных залов, складов и т. п. При этом диаметры куполов Шведлера постепенно увеличивались. Так, если диаметр купола, сооруженного на газовом заводе в Гельвеге в 1865 г., был равен 40,79 м, то диаметр купола над газгольдером в Вене, построенном в 1874—1875 гг., равнялся 64,52 м.

Что же касается собственно производственных зданий, то связанный с развитием технологий рост пролетов, крановых нагрузок и высот привел к созданию производственных зданий с рекордными параметрами. В качестве примера можно привести два объекта, созданные в 70-х годах XX века в СССР, когда увлечение гигантизмом в промышленности было в разгаре. В это время господствовал принцип увеличения единичной мощности, который приводил к заметной удельной (на единицу мощности) экономии материалов за счет «размазывания» всех вспомогательных затрат, которые не зависят от мощности. Лишь после Чернобыльской катастрофы было высказано сомнение в универсальности указанного принципа, поскольку рост мощностей не сопровождается таким же ростом надежности.

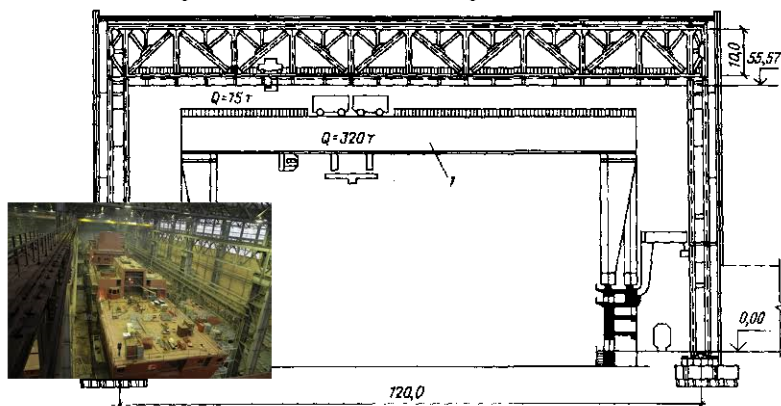


Рис. 4.30. Эллинг Северстали

Первый пример — здание судостроительного эллинга на Северодвинском предприятии «Северсталь». Здание пролетом 120 м, размерами в плане 120×430 м и высотой 68 м (рис. 4.30) обслуживается порталным краном грузоподъемностью 320 т. Шаг поперечных рам 36 м, по нижним поясам ферм, имеющих коробчатое сечение 2×3 м, поперек здания перемещаются краны грузоподъемностью 15 т.

Крупнейшим производственным зданием является главный корпус завода «Атоммаш», его поперечный разрез показан на рис. 4.31. Здание с двумя основными пролетами по 42 м оборудовано сверхмощными кранами грузоподъемностью 600 и 1200 т. Для обеспечения жесткости каркаса используется связевой портал пролетом 11 м.

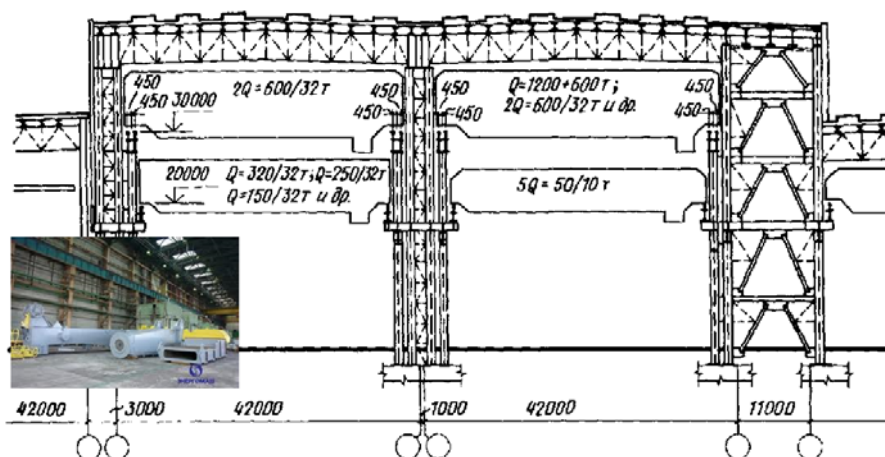


Рис. 4.31. Главный корпус Атоммаша

Какими были первые небоскребы

В возведении многоэтажных зданий, ставшем самостоятельной областью деятельности архитекторов, длительное время отсутствовали тенденции, которые побуждали ко все более смелым решениям при строительстве мостов и большепролетных покрытий. Ни число этажей, ни размеры пролетов перекрытий, ни нагрузки на них не выходили за пределы обыденных решений, свойственных дворцовому либо жилищному строительству.

Первые шаги на пути к стальному каркасу в многоэтажном промышленном строительстве были сделаны в английском ткацком производстве. С целью выиграть рабочую площадь и получить более прочные перекрытия для станков деревянные колонны и деревянные балки

были заменены металлическими. Самым известным многоэтажным зданием было здание, построенное в 1801 г. для компании «Филипп и Ли» в Салфорде (Манчестер), оно имело семь этажей. Чугунные балки, расположенные поперек строения с шагом $\sim 2,7$ м, были оперты на двойной ряд металлических колонн. Балки перекрытий двутаврового профиля поддерживали пологие кирпичные своды.

Еще более ярко проявился разлад между традицией и прогрессом в металлической колонне — этом стройном несущем элементе со старинными декоративными формами капителей, баз либо каннелюр. Уникальные эталоны схожих металлических колонн были установлены на первых британских железнодорожных вокзалах и в павильоне «Ройаль» в Париже. Они представляли собой трубы с капителями в форме пальмовых листьев из гнутого листового железа. Позже металлическая колонна стала массовым конструктивным элементом, который по каталогу можно было заказать хоть какой высоты и в любом стиле — дорическом, тосканском, коринфском, готическом либо мавританском (рис. 4.32).



Рис. 4.32. Металлическая колонна коринфского стиля

Развитие металлических каркасов требовало новейших конструктивных решений; такое развитие началось в Чикаго около 1880 г. Скромный поселок первых переселенцев у впадения р. Чикаго в оз. Мичиган получил в 1830 г. статус города. В 1871 г. численность населения в нем достигла 30 тыс. человек. Город состоял практически из

одних деревянных домов. Пожаром 1871 года город был практически полностью уничтожен, восстановление продвигалось вначале неравномерно. Около 1880 года начинается беспрецедентный подъем строительной деятельности.

Освоение Среднего Запада, развитие железнодорожной сети и водных путей, реализация нужных ископаемых сделали Чикаго крупнейшим фабричным центром. Строительная промышленность едва могла успеть за растущей потребностью в служебных помещениях: складах и магазинах; резко уплотнялась внутриквартальная застройка, высокие дома перерастали в небоскребы. Только благодаря стальному каркасному строительству стало вероятным экономно употреблять земельные участки и площадь застройки, а также повысить темпы стройки. Уже около 1895 года новый способ строительства стал обычным во всех больших американских городах, но в Чикаго к тому времени высотных домов с металлическими каркасами было больше, чем во всех остальных американских городах, вместе взятых.

Но высотные административные строения оказались бы непрактичными, если бы их не оснастили нужной техникой. Важнейшим условием было устройство пассажирских лифтов. Первый подъемник сконструировал Е.Г. Отис, который продемонстрировал его на выставке 1853 года. Первый лифт появился в 1851 году в нью-йоркском отеле на Пятой авеню, начиная с этого момента, первенство в строительстве высотных домов приобрел Нью-Йорк, завоевавший славу сооружением первых девяти-десятиэтажных административных зданий в середине 70-х годов XIX века.

В этот период, когда электричество стало вытеснять пар, развиваются и остальные виды оборудования зданий — телефон, пневматическая почта, центральное отопление и вентиляция.

Основоположником Чикагской архитектурной школы и её главой является Уильям Дженни (William le Baron Jenney). В 1868 году он открывает в Чикаго архитектурную мастерскую; успех пришел к нему после постройки в 1879 году Лайтер-билдинг-I, семиэтажного здания с внутренним металлическим каркасом и несущими наружными стенами (рис. 4.33).

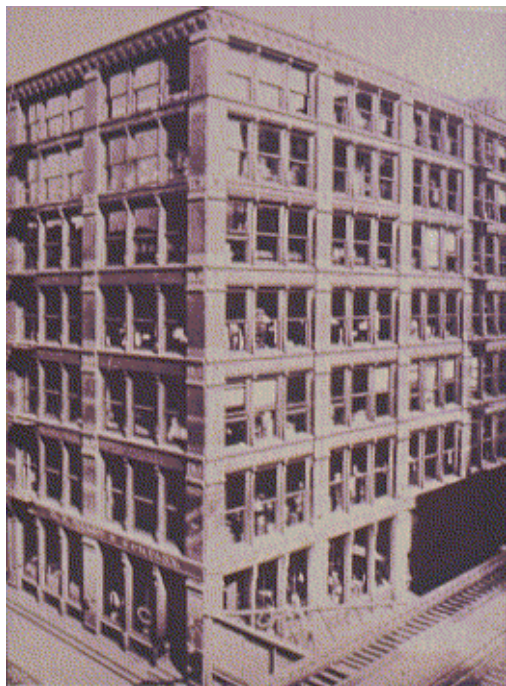


Рис. 4.33. Это считалось небоскребом

В одном из следующих крупных сооружений Дженни — здании страховой компании (1883-1885 гг.) — в основу наружных стен были включены стальные стойки. Главные постройки Дженни — «Фэйр-билдинг» (1891 г.) и «Лайтер-билдинг-II» (1889 г.). Оба эти строения имеют полный стальной каркас, кирпичная кладка выполняет лишь роль облицовки стальных колонн.

Последовательное перевоплощение несущей стены в несущий металлический каркас было в первый раз осуществлено Холабердом (Holabird) и Рошем (Roche) в «Такома-билдинг» высотой 14 этажей. Здание, построенное в 1884 г., сейчас, к огорчению, снесено.

Благодаря независимости несущего каркаса от стен, являющихся лишь ограждающими конструкциями, стало возможным создание сплошного остекления, замена внутренних стен перегородками и уменьшение толщины стен. Возникла возможность существенно ускорить ход строительства — можно было создавать заполнение либо облицовку наружных стенок сразу в нескольких этажах.

Ветровые связи трех еще и сейчас применяемых типов были введены в практику уже в 90-х годах: ветровые связи в виде перекрещивающихся диагональных круглых стержней; порталы и ветровые ра-

мы — там, где для размещения крестовых ветровых связей не было глухих стеновых плоскостей; решетчатые балки либо балки фахверка — с может быть большей высотой, жестко связанные с несущими колоннами в виде рам.

Устройство фундаментов в каркасном строительстве представляло проблему, для решения которой требовалось изменение знакомых уже конструктивных форм. При возрастающем числе этажей несколько колонн стали устанавливать на общий ростверк, а их основание делать в виде сплошной фундаментной плиты.

Прокатные балки из ковкого железа в 1885 году были заменены прокатными балками из литой стали, изготовленными в США «Карнеги Стил компании». С этого же времени перестали использовать и чугунные колонны, на смену которым пришли прокатные профили либо квадратные коробчатые сечения из листовой стали. Болты как средство соединения стали вытесняться заклепками. Таким образом, на рубеже двух веков были разработаны все главные конструктивные элементы, нужные для следующего этапа развития каркасного строительства.

Первый дом высотой в 20 этажей был построен в Чикаго в 1893 году, затем в 1904 г. в Нью-Йорке возведено здание в 30 этажей, а в 1907 г. там же сооружено 47-этажное здание компании Зингер и, наконец, в 1910-1913 гг. построено здание высотой в 55 этажей.

Франция и Бельгия были первыми европейскими странами, в которых получили применение конструкции стального каркаса многоэтажных зданий. Это не случайно — материальные и психологические предпосылки были тут в особенности благоприятны. Уже на заре стройки с применением стали Франция оспаривала первенство англичан. В Европе здания с металлическими каркасами в 20-х и 30-х годах строились от 6–10 до 20–25 этажей, в том числе: в Англии (Лондон, Ливерпуль, Вестминстер) — 12–15 этажей; Германии (Берлин, Лейпциг, Бремен) — 9–13; Швейцарии (Цюрих, Лозанна) — 6–19; Бельгии — 25; Испании — 16; Австрии — 19; Чехословакии — 10.

После первой мировой войны, когда строительная деятельность вновь оживилась, появились железобетонные каркасы, строительство и проектирование зданий из металла несколько отступило на задний план. Постоянно усиливавшаяся конкуренция между сталью и железобетоном оказала в то же время плодотворное влияние на развитие строительной техники и инженерной науки в целом.

Все высотные здания указанного периода имели клепаные каркасы, так как применять сварку в то время в строительных конструкциях не решались из-за отсутствия опыта.

В клепаных каркасах колонны делались двутаврового сечения широкополочных прокатных профилей или составленных из нескольких элементов различных поперечных сечений (рис. 4.34).

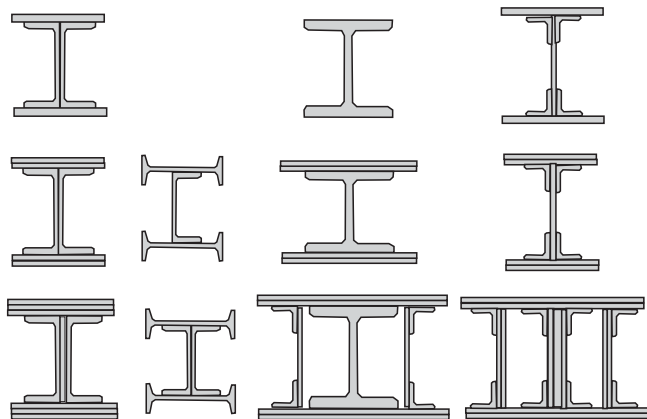


Рис. 4.34. Сечения колонн

Прогон и ригели проектировались также двутаврового сечения и соединялись с колоннами с помощью уголковых коротышей и накладок, образующих мало жесткие соединения. Придание общей устойчивости всему сооружению осуществлялось постановкой вертикальных связей.

Уже в 20-х годах металлостроители ощутили необходимость в совершенствовании конструкций, чтобы для больших зданий и огромных пролетов употреблять преимущественно сталь, а не железобетон. Уровень развития конструкций стального каркаса многоэтажных зданий сделал чуть заметный шаг вперед по сравнению с уровнем, достигнутым в Америке около 1900 года. До этого способы расчета стальных конструкций были еще недостаточно развиты, любая балка перекрытия, прогон либо стойка рассматривались как самостоятельный элемент, и связи между ними принимались шарнирными — старые металлостроители сами говорили о «методе кирпича», когда желали охарактеризовать применявшиеся ими статические схемы.

Применение железобетона вынуждало учесть монолитную природу этого материала, его пространственную взаимосвязь, влияние неразрезности и жесткости узлов и перейти от статики стержня к статике рам.

На примере характерного узла каркаса, построенного в 1931 году знаменитого Эмпайр Стейт Билдинг (англ. Empire State Building) (см.

в другом очерке) отчетливо видно, как тяжело было металлстам подражать строителям, применявшим железобетон, имея в распоряжении тогдашние конструктивные средства: фасонки, соединительные уголки и заклепочные соединения. Из сравнения с соответствующими узлами современного стального каркаса ясно даже специалисту, какие усилия были необходимы, чтобы прийти к жесткому пространственному каркасу, и какие большие успехи были достигнуты с тех пор благодаря переходу от заклепочных соединений к соединениям на сварке и высокопрочных болтах.

Таблица 4.1

Наименование здания	Год постройки	Число этажей	Высота, м	 Сегодняшний рекордсмен
<u>World Building</u>	1890	20	106,4	
<u>Manhattan Insurance</u>	1894	18	106,1	
<u>Park Row Building</u>	1899	30	119,2	
<u>Singer Building</u>	1908	47	186,6	
<u>Metropolitan Life Tower</u>	1909	50	213,4	
<u>Woolworth Building</u>	1913	57	241,4	
<u>40 Wall Street</u>	1930	71	282,5	
<u>Chrysler Building</u>	1930	77	318,9	
<u>Empire State Building</u>	1931	102	443,2	
<u>World Trade Center</u>	1972	110	526,8	
<u>Willis Tower</u>	1974	108	527,3	
<u>Petronas Towers</u>	1998	88	451,9	
<u>Taipei 101</u>	2004	101	508	
Burj Dubai	2012	160	818	

Постепенно вместе с ростом высоты зданий менялась и общая конструктивная схема: простые рамные конструкции дополнялись ядром жесткости, развивалась периферийная система каркаса и осуществлялся переход к так называемому трубчатому каркасу, последний дополнялся ядром жесткости, или получали развитие дополнительные несущие контуры (рис. 4.35).

Сометровый рубеж высоты был преодолен в 1890 году. Как далее развивалась гонка по вертикали, видно из приведенной выше таблицы 4.1, где указаны только те многоэтажные здания, которые некоторое время были рекордсменами высоты.

Обращает на себя внимание своеобразный рекордсмен среди этих рекордсменов — здание Empire State в ранге наиболее высокого прожило 41 год. Что касается сегодняшнего рекордсмена, то большинство экспертов полагают, что в этом ранге он просуществует недолго.

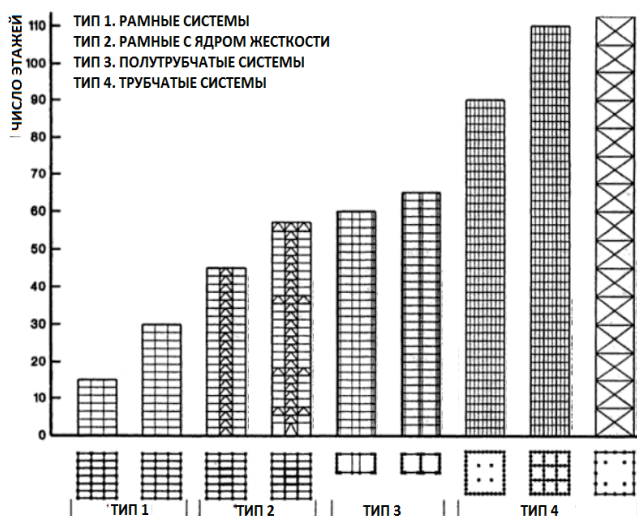


Рис. 4.35. Эволюция структурной композиции высотных зданий

Чемпион 1972-1974 годов, 110-этажные здания-близнецы Всемирного торгового центра в Нью-Йорке были разрушены террористической атакой 11 сентября 2000 года (рис. 4.36), этим варварским актом встретили конструкции небоскребов XXI век. И хотя эти здания были запроектированы с таким расчетом, чтобы выдержать нагрузки от горизонтального удара крупного авиалайнера, устоять под одновременным воздействием удара, взрыва и пожара они сумели лишь около часа.

До сих пор не затихает дискуссия о принципах проектирования таких объектов в «террористическую эпоху». Анализируется конструкция зданий-близнецов, которые были созданы по так называемой «трубчатой (шахтной)» несущей схеме, когда по периметру здания располагаются колонны, в центральной части — ядро жесткости, внутри которого расположено лифтовое хозяйство, и все это объединено дисками перекрытий (рис. 4.37).

Анализируются возможные схемы, которые могли бы предотвратить обрушение при комбинированном воздействии взрыва и пожара, но представляется, что защита от террористической угрозы не лежит в плоскости создания конструкций-мастадонтов, готовых к любой атаке.

а)



б)



Рис. 4.36. Здания Всемирного торгового центра: а) – после постройки, б) – 11 сентября 2000 года

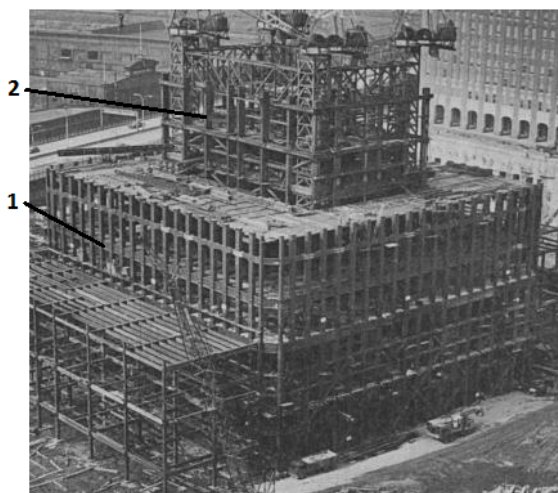


Рис. 4.37. Конструкция каркаса (снимок времени строительства):
1 – контурные колонны, 2 – ядро жесткости

Легкие металлоконструкции

Примерно в середине двадцатого века было осознано, что существует особый класс производственных и вспомогательных зданий, для которых не характерны заметные крановые нагрузки, сложные объемно-планировочные решения и жесткие требования связи с технологическим процессом того производства, для которого возводится здание. С другой стороны, здесь прослеживалась возможность организации массового производства быстровозводимых универсальных зданий с резко облегченным металлическим каркасом. Так зародилась концепция создания так называемых «легких металлических конструкций комплектной поставки (ЛМК)».

Интенсивному развитию подверглись три основных конструктивных решения:

- одноэтажные здания, у которых основной несущий каркас представляет собой раму из сварных двутавровых профилей со сплошной либо перфорированной стенкой (рис. 4.38,*а*);
- здания каркасного типа, у которых на колонны опирается шатер в виде так называемой структурной плиты (рис. 4.38,*б*);
- бескаркасные складчатые здания из тонкого стального листа (рис. 4.38,*в*).



Рис. 4.38. Типичные здания из легких металлоконструкций

Последние два направления развития ЛМК характеризуются более радикальным отличием от классических стальных конструкций производственных зданий и имеют хотя и не большую, но интересную историю развития.

Структурные системы

Мало кому известно, что изобретатель телефона, Александр Грэм Бедд (Alexander Graham Bell) еще в начале XX столетия экспериментировал с пространственными структурами, собранными из восьмигранных и четырёхгранных ячеек (рис. 4.39). Он оценил высокую прочность и малый вес, продемонстрированные этими конструктив-

ными формами, и включил их в несколько из своих проектов, включая и проект планера. Одна из стальных пространственных структур из трубчатых элементов была им использована при строительстве обзорной вышки в США в 1907 году.

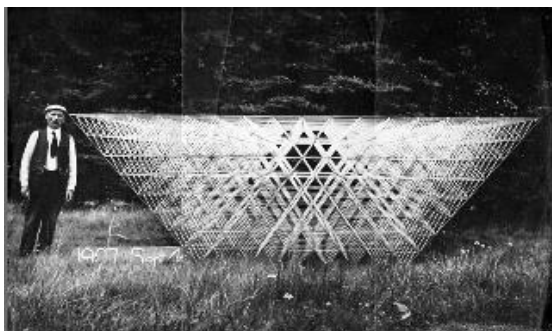


Рис. 4.39. Александр Белл около структурной конструкции

Несмотря на начинания Белла, относящиеся к началу столетия, лишь система MERO стала первой пространственной структурой, широко доступной коммерчески. Она была разработана в Германии доктором Максом Менгерингхаузенем (Max Mengerlinghausen), ее первое применение относится к 1943 году, а популярность этой системы наблюдается уже почти семьдесят лет.

Название MERO получает из сокращения настоящего имени Mengerlinghausen Rohrbauweise. В основе ее конструктивного решения лежит конструкция узлового соединения (рис. 4.40), хорошо приспособленная к варьированию геометрической схемы. Шар с нарезными отверстиями позволяет присоединить трубчатые элементы структуры через концевые болты, входящие в состав структурного элемента.

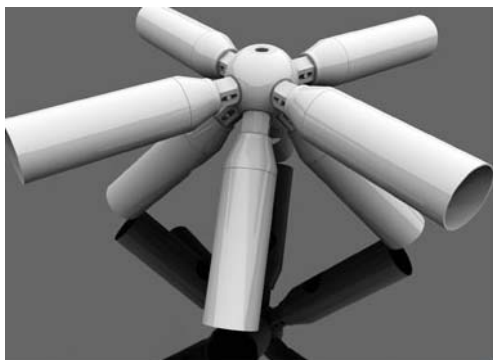


Рис. 4.40. Узел системы MERO

Система состоит из индивидуальных трубчатых элементов, связанных в шаровой узловой детали. Эстетические достоинства и высокая технологичность обеспечили популярность этой системы и ее конкурентоспособность по сравнению со многими другими доступными теперь конструкциями.

Первоначально у системы MERO был только один тип стандартного узла — сфера с 18 отверстиями под углами 45° , 60° и 90° друг к другу. Ряд стандартных длин трубчатых стержней был задуман таким образом, что межузловое расстояние каждый раз увеличивалось в $\sqrt{2}$ раз. Однако, с учетом точности современных станков с программным управлением появилась возможность сверлить отверстия под любым необходимым углом и изготавливать элементы соответствующей длины, достигая таким образом большей гибкости в геометрии.

Во всем мире есть много примеров применения системы MERO, которые накопились за ее семидесятилетнюю историю. Один из недавних примеров использования системы MERO дает покрытие над трибунами Донбасс-арены (рис. 4.41).



Рис. 4.41. Покрытие Донбасс-арены

Начиная с 1950-х годов пространственные структурные системы распространялись по всему миру, архитекторы исследовали их новые эстетические возможности, а инженеры экспериментировали с аль-

тернативными конструкциями узловых соединений и геометрическими схемами.



Рис. 4.42. Узел системы Wachsmann



Рис. 4.43. Узел системы Tridimatic

Например, в США К. Ваксман (Konrad Wachsmann) использовал систему со сложным универсальным соединителем (рис. 4.42), который позволял примыкание до 20 трубчатых элементов. С. дю Шато (Stephane du Chateau) во Франции предложил узловое соединение на фасонках, штампованных по пространственной форме, а в Канаде фирма «Фалтимен» разработала систему Tridimatic (рис. 4.43), и этот перечень можно продолжать довольно долго.

Поскольку не во всех случаях целесообразно использование полностью рассыпной конструкции, довольно скоро появились альтернативные проекты, основанные на использовании плоских ферм или пространственных пирамид с треугольным, квадратным или шестиугольным основанием.

Одна из первых альтернативных систем такого рода появилась в Великобритании в 1950-х годах под названием Space Decks (рис. 4.44). Она была основана на готовых стальных пирамидальных модулях ($1,22 \times 1,22$ м в плане и 1,05 м или 0,61 м по высоте). Система Space Decks с тех пор широко использовалась для конструкций покрытия и междуэтажных перекрытий лишь с небольшой модификацией размеров модуля и используемых материалов.

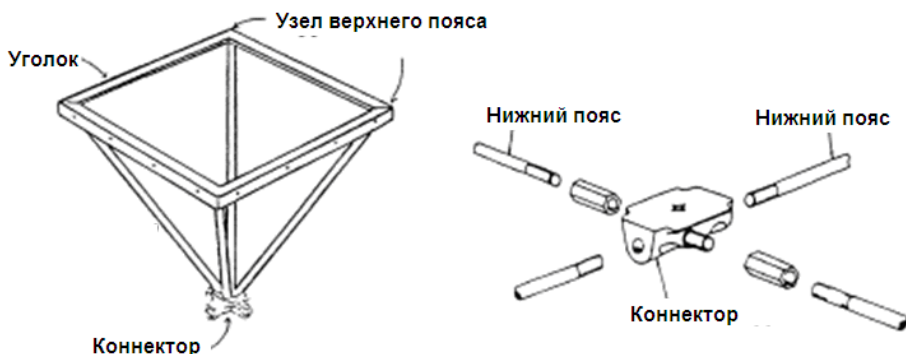


Рис. 4.44. Система Space Decks

Позже были разработаны и другие решения такого рода, которые нашли применение в зарубежной и отечественной практике.

Бескаркасные складчатые конструкции

Первый патент на складчатое покрытие был выдан в 1937 году. В кровельном покрытии полигонального в плане сооружения прикреплялся тонколистовой настил в виде плоских треугольных панелей, расположенных под углом к поясам с образованием складчатого покрытия. В 40–50-ых годах в США был выдан ряд патентов на бескаркасные складчатые здания арочного или сводчатого очертания, образующихся из примыкающих непосредственно друг к другу одинаковых арок, составленных из лоткообразных элементов трапецевидного, треугольного и U-образного сечения (рис. 4.45). В нашей стране первое авторское свидетельство по складчатым конструкциям было выдано в 1945 году на складчатый свод из листового металла.



Рис. 4.45. Арочная конструкция склада

С 1950 по 1965 год в различных странах — США, Великобритании, Австрии, Франции и ФРГ — на складчатые элементы и соору-

жения, собираемые из них, было получено около двух десятков патентов. В этих решениях складчатые конструкции получили дальнейшее развитие. Окончательно обозначились два основных направления, первое из которых — формирование систем из лоткообразных элементов; второе — из ромбических или треугольных элементов.

В период с 1965 по 1974 год на складчатые конструкции выдано уже более 30 патентов и авторских свидетельств. Из всего множества решений наиболее типичными, характеризующими первое из указанных выше направлений и представляющими особый интерес с конструктивной точки зрения, являются представленная на рис. 4.46. конструкция из лоткообразных элементов [20].



Рис. 4.46. Бескаркасное складчатое здание

Отечественная промышленность освоила выпуск таких складчатых зданий, серийно изготавливаются бескаркасные здания пролетом 12, 15, 18, 24 и более метров. Элементы, из которых собираются эти здания, имеют лоткообразную угловую форму и высокую тонкостенность граней (отношение толщины грани к наименьшему из ее поперечных размеров), которая достигает значения $1/300 \dots 1/1500$.

Конструкции из ромбовидных элементов использовались не очень часто. Основным конструктивным элементом в таких системах последних может служить лист ромбовидной формы (рис. 4.47), согнутый вдоль большей диагонали.

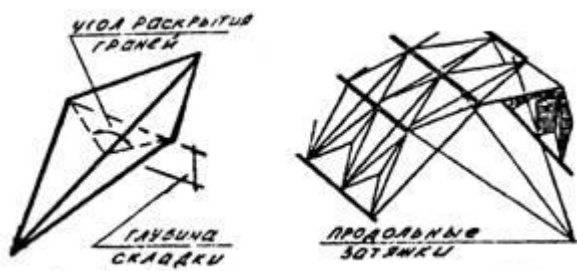


Рис. 4.47. Конструкция с ромбовидными складками

Сопряжения ромбовидных элементов между собой может осуществляться при помощи цилиндрических шарниров или жесткими фланцевыми сочленениями. Для повышения пространственной жесткости покрытия (особенно при шарнирных сопряжениях) необходимо предусматривать установку продольных затяжек по выступающим узлам складчатого свода.

Очерк пятый. РАЗВИТИЕ АНТЕННО-МАЧТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Этот очерк несколько отличается от предыдущих, он в основном построен на личных впечатлениях. На протяжении многих лет автор наблюдал и зачастую активно участвовал в процессе реального проектирования высотных сооружений объектов связи, а также имел возможность контактировать с большинством выдающихся специалистов в области высотного строительства. Это дает автору смелость для изложения истории появления и реализации сформулированных ими основных идей.

Однако именно участие автора в описываемой истории вряд ли допускает полную объективность и беспристрастность (хотя такое подразумевалось замыслом этой работы), кроме того, нельзя полагать, что обзор является исчерпывающе полным.

Следует сделать еще одно вступительное замечание: так сложилось, что разработка высотных конструкций ориентировалась почти целиком на отечественный опыт. Это было связано не только с условиями секретности или закрытости нашего общества, но и с тем, что такие отечественные ученые как Юрий Адольфович Савицкий и Александр Георгиевич Соколов во многом формировали не только отечественный, но и мировой опыт разработок в области строительства антенных сооружений.

Использование аэродинамических свойств трубчатых элементов

Сегодня уже практически никто не мыслит проектирование высотных сооружений без учета их аэродинамических свойств, тот факт, что ими не интересовались на заре высотного строительства, давно забыт. Именно поэтому полезно вспомнить, как и кому пришла мысль о создании «радиобашни обтекаемого типа».

Взаимодействие конструкции с ветровым потоком во многом определяет не только величины действующих на конструкции усилий, но и характер поведения конструкции, в частности, возможность ее вибрации. Этот фундаментальный факт был осознан еще во времена Эйфеля, который, кстати, проводил на своей башне первые эксперименты по аэродинамике. Однако только в сороковые годы прошлого века возникла идея создания стальной конструкции с улучшенными аэродинамическими свойствами. Башни-антенны, ставшие одним из основных типов высотных сооружений и получившие тогда достаточно широкое распространение, работали, в основном, на ветровую нагрузку, и ее снижение было очевидным способом достижения экономии металла.

В 1941 году в проектной конторе Стальконструкция (ныне ЦНИИ-проектстальконструкция им. Н.П. Мельникова) совместно с ЦАГИ и Наркоматом связи был проведен большой комплекс исследований по анализу основных факторов, определяющих конструктивную форму радиобашен.

Для высотных сооружений наиболее эффективным сечением элементов является трубчатое сечение, его коэффициент лобового сопротивления C_x зависит от числа Рейнольдса Re . График для вычисления C_x трубчатого сечения по действующим нормам показан на рис. 5.1, и на этом графике видно, что при $Re > 1,5 \times 10^5$ (за кризисом обтекания) происходит резкое снижение ветровой нагрузки.

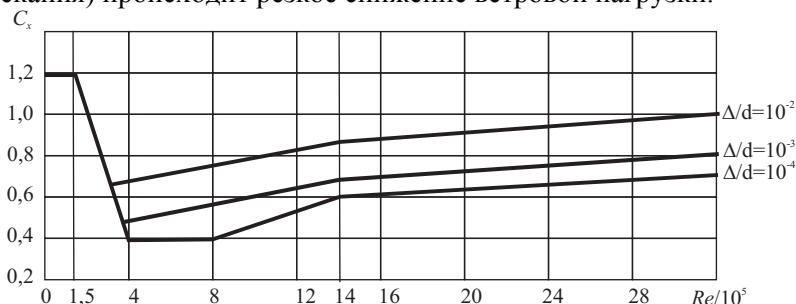


Рис. 5.1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса

Ветровая нагрузка на трубу диаметром 150 мм в условиях закризисного обтекания и равновеликий по теневой площади уголок 150×150 мм будет отличаться в три раза, так как их коэффициенты лобового сопротивления C_x равны соответственно 0,45 и 1,4.

Было установлено, что в интервале скоростей ветра от 0 до 55 м/с все круглые сечения диаметров от 40 до 100 мм имеют ветровую на-

грузку большую, чем при круглом сечении диаметром 160 мм. Это видно из рис. 5.2, где показана огибающая ветровых нагрузок на 1 п.м. трубчатого элемента диаметром D в диапазоне скоростей ветра от 0 до 50 м/с.

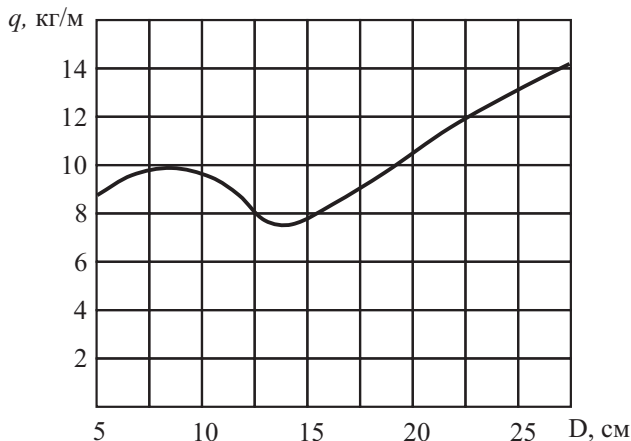


Рис. 5.2. Ветровая нагрузка на трубы разного диаметра

Поскольку даже незначительное увеличение ветровой нагрузки в верхней части башни влечет за собой резкое увеличение напряжений в ее нижней части, то целесообразно уменьшать ветровую нагрузку вверху любым способом, в том числе и за счет перехода к трубам большего диаметра, несущая способность которых будет при этом недоиспользоваться. В результате было найдено конструктивное решение «радиобашни обтекаемого типа»¹, вес которой был в 2–2,5 раза меньшим, чем у ранее использовавшейся угловой башни. Использование трубчатых сечений позволило также применить в стыках фланцевые соединения, которые заметно упростили монтаж.

Идея использования сечений, наиболее благоприятных с точки зрения обтекания ветровым потоком, абсолютно себя оправдывает в случае, когда ветровая нагрузка формируется, главным образом, за счет парусности элементов башни (или мачты). Но кроме основных и вспомогательных конструкций опоры, для которых выбор поперечных сечений определяется проектировщиком, имеются и ряд других элементов сооружения (кабели, устройства подъема на опору и др.), которые участвуют в формировании ветровой нагрузки. С ростом

¹ За эту работу авторский коллектив в составе А.Г.Соколова (руководитель), А.А. Господарского, Н.С. Пономарева и Г.А. Савицкого в 1946 году был удостоен Государственной премии СССР.

насыщенности антенных устройств радиотехническим оборудованием доля последних постоянно повышается, и тогда оказывается, что выгоднее вернуться к башням из обычного фасонного проката, стоимость которого намного меньше стоимости труб.

Альтернативным решением послужило использование мачт, стволы которых проектировались из вальцованной трубы диаметром от 1600 до 2400 мм. Секции ствола соединялись на фланцах (И.Г. Затуловский) или на сварке (Е.Н. Селезнева). Внутри этой трубы можно было расположить все разводки и коммуникации, фидерные линии, волноводы, лестницы и площадки, лифтовое хозяйство и т. п. (рис. 5.3), все это оказывается защищенным от действия ветра.

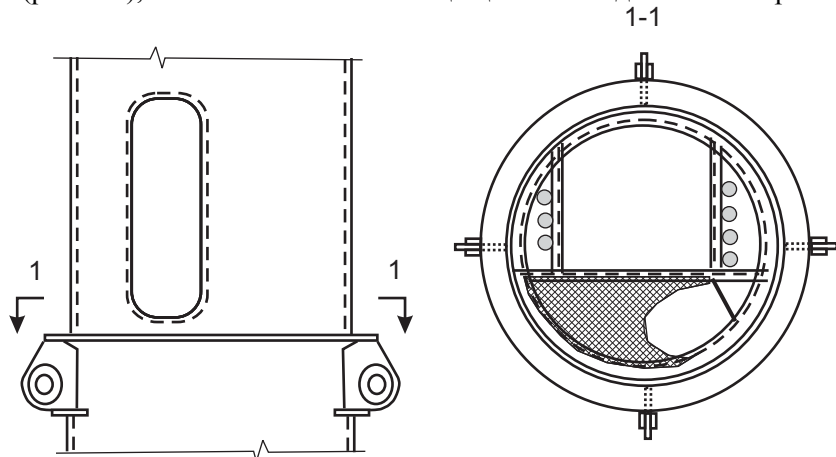


Рис. 5.3. Ствол однотрубчатой мачты

При проектировании таких мачт был предложен и осуществлен (Е.Н. Селезнева, Е.П. Морозов) способ свободной установки стволов мачты на фундамент без опорных балансиров и анкерных устройств вместо широко применявшихся сложных в конструктивном отношении сварных или литых опорных балансиров.

Использование рей для подкрепления оттяжек

В середине 50-х годов было принято решение о массовом строительстве телевизионных центров, в том числе новых многопрограммных телецентров в Москве, Ленинграде и столицах союзных республик высотой порядка 300–500 м. Поскольку строительство должно было происходить в городах, следовало считаться со стесненностью

территории под застройку, и это почти очевидным образом предопределяло невозможность использования мачт на оттяжках.

Тогда же под руководством А.Г. Соколова был выполнен комплекс исследований и разработок, направленных на поиск оптимального технического решения телевизионной опоры высотой 550 метров для Москвы. В частности, в рамках такого исследования была выработана концепция мачтовой опоры со стволом из одной трубы и с круто поставленными оттяжками, позволяющими установить такую мачту на стесненной территории. Для обеспечения необходимой жесткости ствола и улучшения вибростойкости таких оттяжек была предложена система с реями, которые уменьшали провисание оттяжек.

Использование рей резко уменьшает «геометрическую составляющую» удлинения ванта (удлинение за счет распрямления), что приближает работу гибкой нити к работе простого растянутого стержня и позволяет таким образом обеспечить необходимую жесткость оттяжечных опор ствола, даже при больших углах наклона оттяжек к горизонту.



Рис. 5.4. Мачта с реями: в Виннице



Рис. 5.5. Телевизионная опора в Витебске

Как известно, из некоторых политических соображений в Москве была принята к строительству схема железобетонной телевизионной башни², а упомянутое предложение удалось реализовать лишь позже, когда в 1961-1965 годах было построено десять таких мачт (Е.Н. Селезнева) высотой от 151 метра в Архангельске и Калининграде до 354 метров в Виннице (рис. 5.4).

Это схемное решение послужило толчком к более серьезному анализу привычных схем высотных сооружений и пересмотру ряда сложившихся стереотипов. В какой-то мере мачта с реями могла претендовать на право называться комбинированной системой, имеющей промежуточные свойства между традиционными мачтами и башнями. Отсюда недалеко было уже до использования рей в системе шпренгельного подкрепления по типу опоры в Витебске (рис. 5.5), запроектированной УкрНИИпроектстальконструкцией (М.П. Кондра).

Объединение мачт в единую систему

Необходимость создания больших радиотехнических отражающих поверхностей привела к идее устройства мачтовой системы, в которой отражающая сетка (рефлектор) используется в качестве элемента, объединяющего опоры, в то время как усилия в перпендикулярном направлении опоры раскрепляются обычными оттяжками (рис. 5.а) или же работают по башенной схеме (рис. 5.б,в).

Если система не является плоской, а отражающая поверхность описывается по кривой с кривизной одного знака, то оказывается возможным отказаться от поперечных оттяжек, направленных внутрь параболического цилиндра (рис. 5.б,в).

Такого рода система была создана в 1948-1952 гг. по проекту ЦНИИпроектстальконструкции (А.Г. Соколов, Ю.А. Савицкий) для реализации идеи коротковолновой передающей радиосистемы, предложенной Г.З. Айзенбергом (НИИ Радио).

Это были антенные системы с отражающими поверхностями размерами 900x200 м и 450x120 м, имевшие несколько облучателей. Антенны работали без перестройки в диапазоне волн 12-50 м, где коэффициент усиления составлял 800-10000. Для создания радиотех-

² Сметная стоимость железобетонной башни (0,8 млн. рублей) более чем вдвое превышала сметную стоимость стальной башни и более чем втрое — стальной мачты с круто поставленными оттяжками. Фактическая стоимость составила около 30 млн. рублей. Фактическая стоимость винницкой мачты (0,3 млн. рублей) мало отличалась от проектной.

нической отражающей поверхности, состоящей из часто расположенных горизонтальных нитей, образующих в плане вписанную в параболу складчатую поверхность, А.Г. Соколовым и Г.А. Савицким была предложена и реализована эффективная мачтовая система.

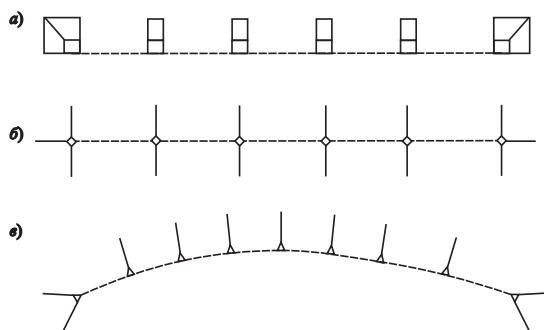


Рис. 5.6. Компоновка отражающих поверхностей (план)

Она состояла из тринадцати вертикальных мачт высотой 186 м, расположенных в точках перелома направления складки, которые поддерживались горизонтально расположенными нитями, механически связывающими мачты между собой, промежуточных оттяжек, расположенных в биссекториальных плоскостях с внешней стороны рефлектора, и концевых оттяжек (рис. 5.7). Мачты запроектированы решетчатыми трехгранными со стороной в плане 2,2 метра и с шарнирным опиранием на фундамент.

В 1956 году эта работа была удостоена Ленинской премии.

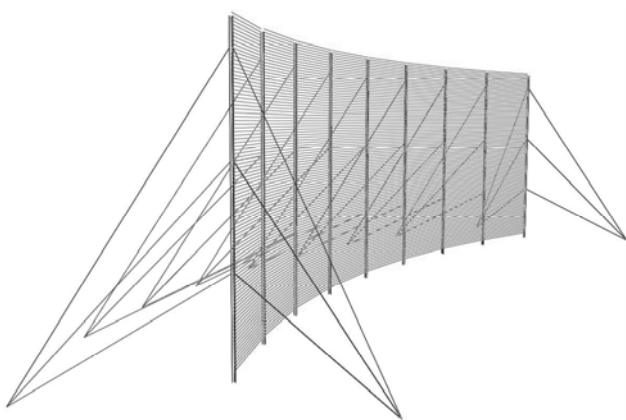


Рис. 5.7. Отражающая поверхность

Впоследствии мачтовые системы с рефлектором широко использовались для подвески антенн СГД-РА, они проектировались в институте Укрпроектстальконструкции (А.В. Перельмутер, М.П. Кондра) и имели при этом ломаную форму в плане и не обязательно мачты одинаковой высоты (рис. 5.8).

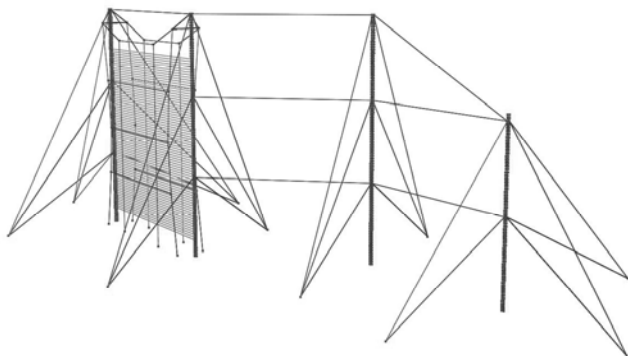


Рис. 5.8. Система мачт для подвески антенн СГД-РА (антенна условно показана только в одном пролете)

При этом некоторые проектные решения были рекордными по расходу металла, что позволило, например, выиграть международный тендер у всемирно известной фирмы Маркони на строительство радиостанции в Багдаде.

Упомянутые антенны подвешивались также и на башенных опорах. Поскольку нагрузки от антенн и рефлектора намного превышали ветровую нагрузку на конструкции башни, то последние выполнялись не трубчатыми, а из более дешевого фасонного и листового проката (в поясах использовались крестовые сечения, сваренные из листов).

Проектирование систем для антенн с рефлекторами поставило еще одну конструктивную задачу: необходимый по технологическим условиям спуск антенного полотна нельзя было реализовать привычным способом опускания реи, на которую крепится антенна (рис. 5.9,а), поскольку этому мешал рефлектор.

Для решения этой проблемы была предложена оригинальная система подвески антенных полотен (Л.Г. Дмитриев, А.В. Перельмутер) которая не только решала задачу, но и снижала усилие, передаваемое на опору от натяжения леерного каната примерно на 85% (рис. 5.9,б). Конструктивные решения антенных полотен и мачтовых систем СГД-РА использовались и для антенн другого типа. В частности, был предложен проект для логарифмической антенны, где стволы мачт должны были располагаться наклонно (рис. 5.10).

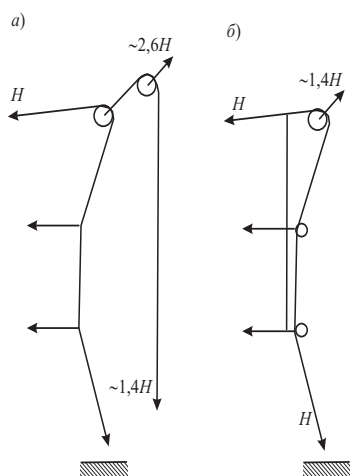


Рис. 5.9. Подвеска антенной сети

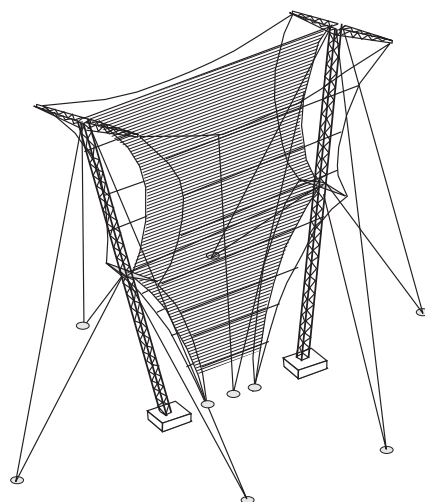


Рис. 5.10. Логарифмическая антенна

Сети для антенно-мачтовых систем сверхдлинноволновых радиостанций

Антенные полотна вертикально располагаемых антенных сетей СГД и СГД-РА имели габариты порядка сотни метров, гораздо большие размеры были применены в антеннах сверхдлинных волн (СДВ). Радиостанции на СДВ могут обеспечить устойчивую радиосвязь с объектами, находящимися в любой точке земного шара и в любых условиях — на земле, в воздухе, в воде и под водой (связь с подводными лодками).

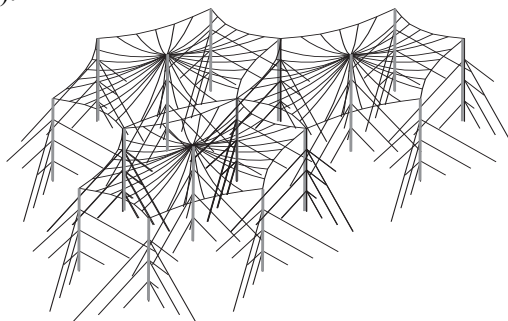


Рис. 5.11. Антенно-мачтовая система СДВ, комплекс из трех антенн

Размеры антенных устройств, которые всегда соизмеримы с длиной излучаемой волны, потребовали для создания СДВ-радиостанций крупнейших антенно-мачтовых сооружений, сложных в инженерном отношении и требующих особого подхода к проектированию, строительству и эксплуатации.

Первая антенно-мачтовая система такого типа «Голиаф» была построена в Германии у города Кальбе в 1943 году, в 1949-1952 годах она была воссоздана в Нижегородской области. Передающая антенна «Голиафа» состоит из трех зонтичных частей (рис. 5.11), расположенных вокруг трёх опор, представляющих собой стальные трубчатые мачты высотой 210 метров. Углы антенны закреплены на решётчатых мачтах высотой 170 метров, расположенных в вершинах правильных шестиугольников, вписанных в окружность диаметром 800 метров.

Путем выбора оптимального наклона сбегающего каната удалось исключить передачу горизонтальной составляющей натяжения полотна на периферийные мачты. Начиная с 1965 г., уравнивающая система подвеса секторов антенных полотен (Л.В. Шофлер) задействована при проектировании и строительстве всех последующих отечественных СДВ-радиостанций (некоторые из них имели еще большие размеры).

Разработчикам и строителям антенно-мачтовых сооружений для радиостанций на сверхдлинных волнах в 1975 году была присуждена Государственная премия СССР.

Обеспечение требуемой жесткости

Появление радиорелейных линий связи, оснащенных остронаправленными антеннами, резко поставило вопрос об обеспечении необходимой жесткости сооружений относительно углов поворота мест крепления антенного оборудования (превышение допустимых углов поворота приводит к заметному снижению коэффициента полезного действия антенной системы). Условия жесткости высотных сооружений, предназначенных для установки коротковолнового радиотехнического оборудования, могут в некоторых случаях коренным образом повлиять на выбор конструктивного решения.

Были предложены многие оригинальные схемные и конструктивные решения, которые решали ту или иную частную задачу по обеспечению жесткости, но наиболее общими идеями, которые оказали свое влияние на ряд технических решений были следующие две:

а). Можно задать требования по деформативности не в традиционной форме ограничения значений перемещения или поворота под действием нормативной нагрузки, а в форме требования по обеспеченности такого ограничения в течение определенной доли времени. Если, например, потребовать чтобы условия второго предельного состояния выполнялись в течение 95% времени (это значит, что до 5% времени допускается снижение КПД излучателя), то проверка будет выполняться при нагрузке примерно равной 45% нормативной (Г.А. Савицкий, М.М. Ройтштейн). Такой подход был достаточно революционным по сравнению со стандартным способом ограничения деформативности, впоследствии он нашел себе применение в нормах Украины по нагрузкам и воздействиям ДБН В.1.2-2:2006.

б). Для остронаправленных антенн требования жесткости относятся к углу поворота конструкции в месте расположения излучателя, а не к ограничению перемещений, которые с точки зрения обеспечения технологического регламента могут быть весьма значительными. Тогда возможно использование опор пантографического типа, предложенных Е.П. Морозовым (рис. 5.12,а), или других аналогичных решений (рис. 5.12,б).

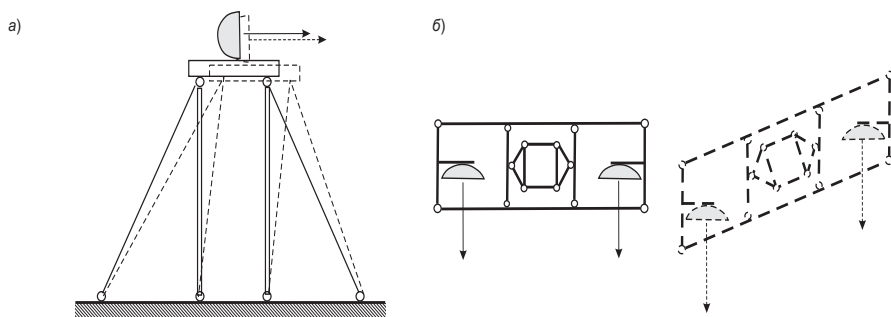


Рис. 5.12. Пантографические системы

Несимметричная компоновка башни

Опыт проектирования телевизионных опор большой высоты показал, что традиционное компоновочное решение с расположенной по оси симметрии шахтой лифта приводит к заметному перерасходу стали, поскольку шахта лифтов, расположенная в центре башни, практически не участвует в работе на общий изгиб.

По требованиям удобства эксплуатации к антеннам должен быть обеспечен доступ грузового лифта, а на башне размещены два техни-

ческих здания, к которым тоже обеспечен доступ пассажирского и грузового лифтов (грузоподъемность 500 и 200 кг соответственно). Естественной была попытка пустить лифт по одному из поясов башни. Однако конструкторы лифтового оборудования категорически возражали против наклонного подъема. Тогда было предложено перейти к несимметричной схеме с вертикальным поясом (А.В. Перельмутер).

Но если конструкция несимметрична, то почему должны быть симметрично расположены антенны? Ведь их можно расположить так, чтобы цилиндрические оболочки имели не общую ось, а общую образующую. Тогда можно обойтись двумя лифтами вместо трех, отказаться от второго машинного помещения и образовать удобную схему движения самоподъемного монтажного крана, не требующую его перестановки по горизонтали (рис. 5.13,б).

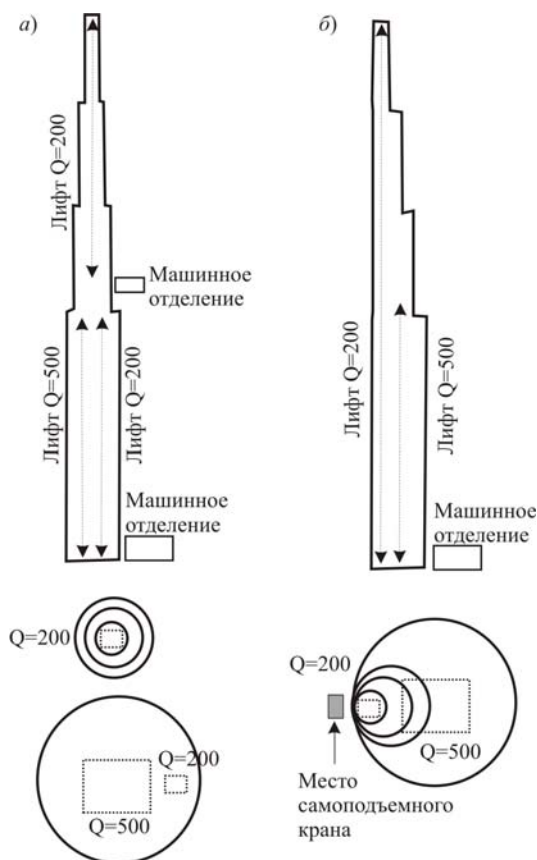


Рис. 5.13. Симметричная и несимметричная компоновка антенной системы и шахты лифтов

Такой вариант технического решения впервые был опробован в проекте телевизионной башни в Тбилиси, затем он использовался в пражской телевизионной башне и в нескольких других сооружениях. А несимметричная компоновка антенной системы стала практически типовой, поскольку она оказалась удачной как с точки зрения размещения фидерно-кабельного хозяйства, так и с точки зрения архитектурной — она мало противоречила даже симметричному облику башен.

Монтаж способом подрачивания

С самого начала высотного строительства проблема монтажа стояла очень остро, и для сколь-нибудь высоких сооружений технология монтажа во многом определяла и некоторые конструктивные решения. В практике имели место случаи, когда от принятой, казалось бы, удачной схемы сооружения приходилось отказываться лишь потому, что ее осуществление было чрезвычайно трудоемким и сложным или даже просто невозможным.

Традиционно здесь применялся монтаж наращиванием с использованием приставного (прислонного) крана, самоподъемного портала, подвесного крана и т. п. В частности, применялся и первый ползучий кран для монтажа четырехгранных радиомачт, разработанный под руководством А.А. Господарского в 1934 г., а также кран конструкции Л.Н. Щипакина. Использовались переставные стрелы и порталы, для относительно невысоких опор применялись передвижные или прислонные краны.

Переход от фланцевых соединений к сварным указал на серьезную проблему сварки ответственных узлов в монтажных условиях. Высказывались опасения в отношении качества сварки на высоте и возможности осуществления ее контроля.

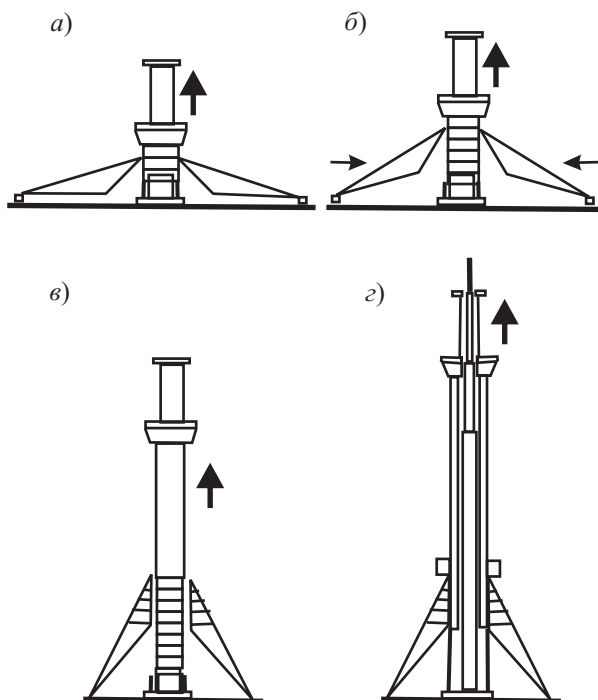


Рис. 5.14. Башня Киевского Телецентра. Монтаж

Этим ставилась под сомнение сама идея сварной конструкции. Таким образом, появилась мысль о необходимости совершенствования монтажа конструкций в направлении улучшения условий выполнения ответственных сварных соединений и контроля их качества, добиваясь выполнения всей сварки внизу, на постоянных рабочих местах. Это могло быть достигнуто при переходе от монтажа наращиванием к подращиванию конструкции, и такая идея была впервые высказана при проектировании башни Ленинградского телецентра (Л.Г. Дмитриев, А.И. Калинин, О.И. Шумицкий). Однако реализовать ее удалось значительно позже при монтаже опоры Киевского телецентра (рис. 5.14).

Следует отметить, что подращивание потребовало заметного расхода стали на оснастку, что окупается лишь при многократном ее использовании. Поскольку крупные телевизионные опоры возводятся по сугубо индивидуальным проектам, использования метода подращивания при их строительстве больше не было, но определенная серийность имелась в проектах вытяжных труб, и здесь способ подращивания нашел себе применение.

С началом внедрения метода подрачивания к конструктивно-компоновочным формам башен стали предъявлять особые требования. Призматическая часть башни приобрела постоянное сечение по высоте без переломов граней. При этом площадь сечения поясов выдвижной части башни изменяется за счет толщины стенки несущих элементов, в которых не допускаются узлы с выступающими за внешний контур деталями. Устойчивость выдвижной части обеспечивает нижняя пирамидальная часть вытяжной башни, которая одновременно воспринимает усилия от подъемно-тяговой системы.

Борьба с вибрациями

Возрастание высот и увеличение гибкости выявили проблему борьбы с вибрациями отдельных элементов конструкции, а позже и целых сооружений. Причиной этого явления были турбулентные пульсации ветрового потока, которые приводили к колебаниям в направлении ветра, или аэродинамическая неустойчивость (автоколебания), вызывавшая интенсивные вибрации поперек ветрового потока.

Разрабатывались два основных направления антивибрационной защиты

- аэродинамические способы гашения колебаний (спирали, перфорированная решетка, каналы у острых кромок и т. п.);
- установка механических гасителей колебаний (ударные и динамические гасители, демпферы и т. п.).

Аэродинамические способы и устройства (М.И. Казакевич, А.Г. Соколов, Г.М. Фомин) связаны с применением средств, изменяющих характер обтекания сооружения ветровым потоком таким образом, чтобы исключить возможность появления подъемной силы, меняющей периодически знак направления и тем самым вызывающей автоколебания. Здесь использовалась установка дополнительных деталей (интерцепторов), меняющих картину обтекания сечения — полос, прикрепленных к цилиндру; спиральных пластин (рис. 5.15), коротких пластин, устанавливаемых по спирали; перфорированных решеток; каналов у острых кромок и др. Следует отметить, что эти устройства могут повышать лобовое сопротивление конструкции, а тем самым и величину статической части ветровой нагрузки.



Рис. 5.15. Интерцептор на дымовой трубе

Механические гасители применяют для снижения перемещений и усилий от действия пульсаций ветрового давления вдоль направления ветра, но, в основном, при появлении ветрового резонанса.

Масса и тип гасителя выбирается в зависимости от величины приведенной массы башни, частоты, на которой возможно появление автоколебаний и конструктивных ограничений, например, наличия необходимых площадей на башне, на которой будут размещены гасители. Эти условия очень сильно влияют на конструкцию механизма, которым является гаситель, и в связи с этим предложены многочисленные конструктивные решения гасителей (М.П. Кондра, Б.В. Остроумов).

Еще немного о мачтах и башнях

Среди других высотных сооружений (о них немного сказано в следующих очерках) лидирующими все же являются высотные сооружения объектов связи. Даже построенные с другим назначением объекты стали использоваться для радиосвязи, радиовещания и телевидения. Типичным примером здесь может служить судьба Эйфелевой башни, о которой было сказано ранее. Этот символ стремления в высоту оторвался от своих предшественников (а они были) настолько, что еще долгое время оставался непревзойденным. Это хорошо видно из графика на рис. 5.16, где кружками отмечены сооружения в виде башен, а треугольниками — мачты на оттяжках.

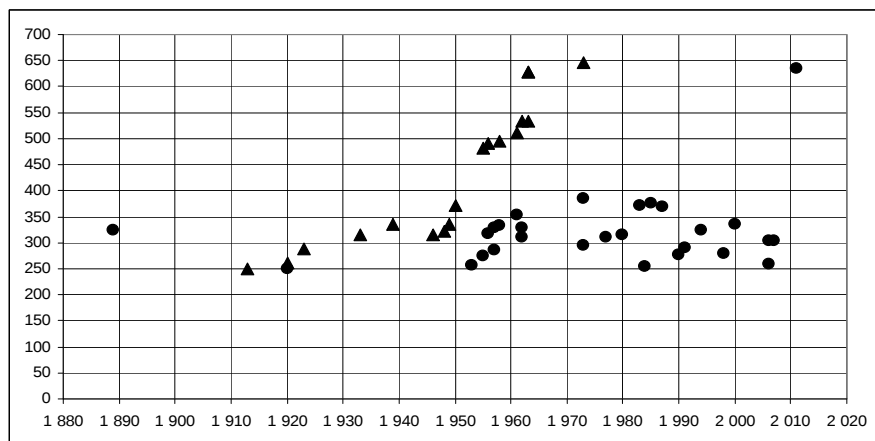


Рис. 5.16. Изменение высоты стальных башен и мачт

Мачты на оттяжках захватили первенство во второй половине XX века и заметно опережали башенные конструкции вплоть до самого недавнего времени, когда в Токио была сооружена башня высотой 624 метра под названием «Небесное дерево». Для мачт этот рекорд сегодня равен 628 метров (KVLY-TV mast), хотя в свое время Варшавская мачта имела высоту 646,38 м. Более подробно эти рекордные сооружения описаны ниже.

а)



б)



Рис. 5.17. Мачты с неклассическим стволом: а – переменного сечения, б – усиленным шпренгелем

За последние полсотни лет предпринимались различные попытки модернизировать конструктивную форму башен и мачт. Это и применение переменного сечения ствола мачты (рис. 5.17), и использование рей, и различные модификации схемы сквозной башенной конструкции (некоторые примеры представлены на рис. 5.18), но все же основной пока остается классическая схема.

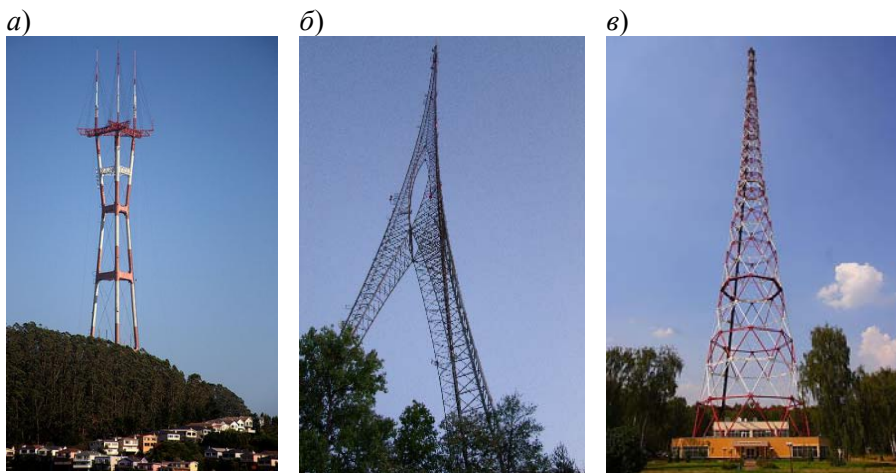


Рис. 5.18. Нестандартные схемы башен; *а* – Сан-Франциско, *б* – Цинцинати, *в* – Москва

В заключение приведем описание рекордной башни и рекордной мачты.

Небесное дерево Токио (англ. Tokyo Sky Tree) — телевизионная башня в округе Сумида, Токио, Япония. Согласно проекту высота башни составляет 634 метра, что почти в два раза выше старой Токийской телевизионной башни. Строительство началось в июле 2008 года, на 22 мая 2012 года запланировано официальное открытие башни. Она будет использоваться для цифрового теле- и радиовещания, мобильной телефонной связи и радионавигации. Кроме того, в башне будут открыты более 300 бутиков, рестораны, аквариум, планетарий и театр. 23 мая 2011 года начался демонтаж кранов, которые использовались для строительства.

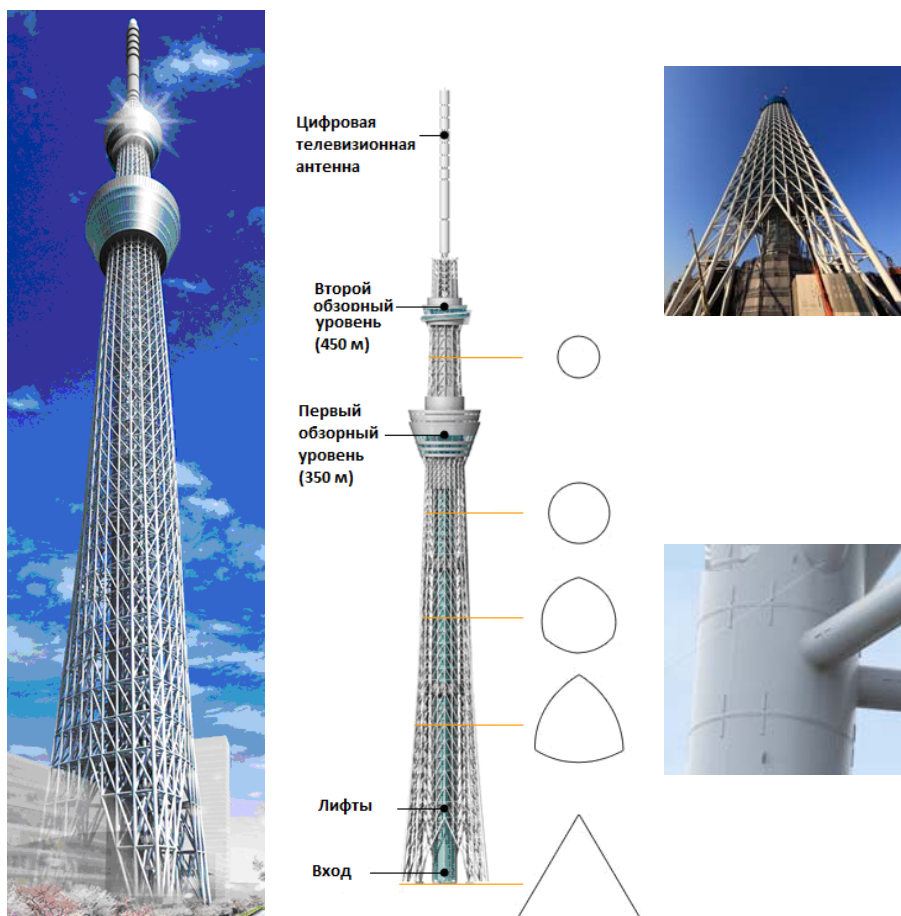


Рис. 5.19. Башня «Небесное дерево»

Сетчатая конструкция башни вписана в достаточно сложную поверхность, меняющуюся по высоте от трехгранника, расположенного в основании башни, до круга на уровне 350 метров (рис. 5.19). Сама сетчатая система представлена 24-мя гранями с треугольной решеткой, расположенной между поясами. Все конструктивные элементы трубчатые, узлы – бесфасоночные на сварке.

Компания Obayashi, возводившая башню, не имела реального опыта строительства таких конструкций, тем самым, работа над данным проектом стала для нее серьезным техническим вызовом. Несущие стальные колонны соединены между собой диагональными связями

под разными углами и не похожи одна на другую. Инженерам пришлось решать совершенно новые для себя задачи в жесточайших условиях.

Учитывая требования к высокой точности строительства и предварительному выявлению коллизий между элементами конструкции, Obayashi решила использовать систему компьютерного 3D-проектирования. Информационная 3D модель предоставила возможность реалистичного отображения строящегося объекта, она была использована собственником и контролирующей организацией для проверки конструкции и уточнения планов строительства. С помощью точного моделирования обеспечивался высокий уровень безопасности и окончательно определялась форма и расположение элементов конструкции. Obayashi получила возможность плавно пройти этап согласования и оформить разрешение на выполнение заключительного этапа разработки проектной документации на раннем сроке благодаря тому, что в модели были описаны и детализованы все узлы. Моделирование также было полезно для лучшего понимания геометрии башни и процедуры монтажа металлических конструкций на каждом этапе.

Варшавская радиомачта — радиомачта высотой 646,38 метров до момента обрушения в 1991 году была самым высоким сооружением на Земле; после этого вплоть до 2008 года (когда небоскреб Бурдж Халифа превзошёл радиомачту по высоте) удерживала пальму первенства как самое высокое когда-либо существовавшее сооружение.

Варшавская радиомачта в сечении представляла собой треугольник со сторонами 4,8 м. Стальные трубы, из которых она построена, имели диаметр 245 мм, а толщина менялась от 34 до 8 мм. Ствол мачты состоял из 86 секций длиной 7500 мм. Мачту в пяти местах её удерживало по 3 оттяжки диаметром 50 мм. Каждая оттяжка крепилась на земле к отдельному фундаменту. Из-за больших токов, наводящихся в оттяжках при работе передатчика, пришлось закрепить их через изоляторы. Общий вес оттяжек и изоляторов 80 тонн, вес металлоконструкций ствола 420 тонн.

В мачту был встроен лифт с максимальной скоростью 0,35 м/с (требовалось 30 минут, чтобы подняться от основания к верхушке мачты); лифт дублировался обычными лестницами.

Мачта обрушилась 8 августа 1991 года во время замены одной из оттяжек (эту версию подтвердил главный конструктор мачты Ян Поляк). Мачта сначала согнулась, а затем разрушилась посередине.

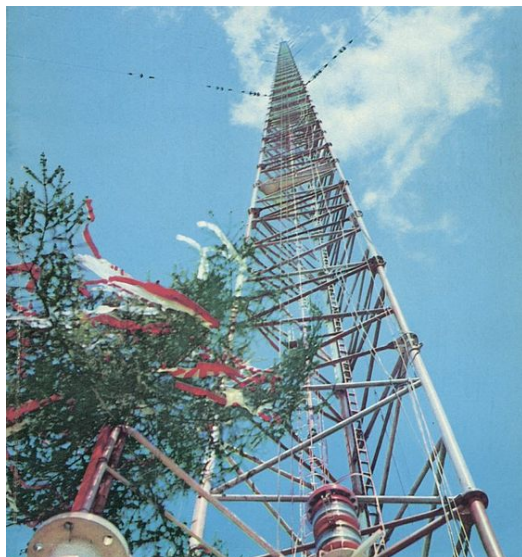


Рис. 5.20. Варшавская радиомачта

После обрушения Варшавской радиомачты пальма первенства среди антенных сооружений мачтового типа вернулась ее предшественнице в высотной гонке — телерадиомачте KVLV-TV в городе Блешар, расположенной в Северной Дакоте, США (рис. 5.21). Высота этой мачты 628 м, масса составляет 392,1 т.



Рис. 5.21. Мачта KVLV-TV

Однако, ей уже далеко да выстроенного в ОАЭ самого высокого здания в мире — небоскреба Бурдж Халифа.

Очерк шестой. ДРУГИЕ ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

И сказали они: построим себе город и башню, высоту до небес, и сделаем себе имя, прежде нежели расеемся по лицу всей земли....

Бытие, гл.11, С.1



.Вавилонская башня (Питер Брейгель, 1563 год)

Библейский текст, приведенный в эпиграфе, свидетельствует о постоянном стремлении человека к созданию высотных сооружений. Кроме небоскребов и антенных устройств, о которых уже шла речь выше, имеются и другие высотные сооружения различного типа и назначения. Большинство из них являются металлическими конструкциями и история их развития представляет интерес для профессионала-металлиста. Сведения о рекордных высотах этих сооружений приведены в таблице 6.1.

В этом очерке мы рассмотрим лишь некоторые конструкции такого типа.

Таблица 6.1

Тип сооружения	Наименование	Высота, м	Год
Свободстоящая башня	Башня «Небесное дерево» в Токио	634	2011
Мачта на оттяжках	Телеретранслятор в Северной Дакоте	628,8	1963
Опора ЛЭП	Переход через Янцзы	346,5	2004
Опора ветрогенератора	Ветроагрегат FL-2500 в Бранденбурге	205	2006
Водонапорная башня	Главная башня Кувейта	187	1979
Флагшток	Душанбинский флагшток	165	2011

Башни ветротурбин

Башни для ветроэнергетических установок являются относительно новым типом стальных конструкций массового применения. Эти конструкции разрабатываются в тесной увязке с конструкцией ветротурбины, которая должна быть установлена на башне и часто выпускаются теми же самыми фирмами, что и ветротурбина. Поэтому многие конструктивные детали упомянутых башен следуют конструктивной традиции машиностроения, хотя по своей сути башни для ветроэнергетических установок являются строительными металлоконструкциями.

В настоящее время в мире ежегодно изготавливается несколько тысяч таких конструкций и наблюдается тенденция к увеличению объемов их производства.

Предыстория

История ветроэнергетики начинается с незапамятных времён. Энергия ветра вот уже более 6000 лет надежно и верно служит людям. Первые простейшие ветродвигатели применяли в глубокой древности в Египте и Китае. В Египте (около Александрии) сохранились остатки каменных ветряных мельниц барабанного типа, постро-

енных ещё во II-I вв. до н.э. (рис. 6.1), но уже в 7 в. н.э. персы строили ветряные мельницы уже более совершенной конструкции - крыльчатые. Мельницы такого типа были распространены в исламском мире и в XIII-м веке принесены в Европу крестоносцами.

Начиная с XIII в., ветродвигатели получили распространение в Западной Европе, особенно в Голландии, Дании и Англии, для подъёма воды, размола зерна и приведения в движение различных станков.

В Нидерландах ветряные мельницы откачивали воду с земель, ограждённых дамбами, а в засушливых областях Европы применялись для орошения полей.

а)



б)

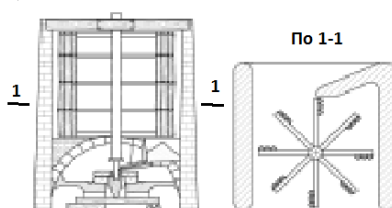


Рис. 6.1. Древние ветряные мельницы барабанного типа:

а – общий вид, б - схема

Но у ветра есть существенный недостаток: он часто меняет направление. Как же добиться того, чтобы крылья мельницы были всегда расположены с учетом направления ветра? И вот придумали «столбовки». Эти мельницы покоились на столбе, подпертом балками, что позволяло поворачивать весь мельничный амбар, устанавливая крылья против ветра. По понятной причине «столбовки» не могли быть очень большими, и тогда придумали другую конструкцию: неподвижную башню с вращающейся крышей. В мельницах такого типа главный вал выходит из крыши, благодаря чему, куда бы ни дул ветер, ее вместе с крыльями-парусами можно развернуть против ветра.



Рис. 6.2. Европейская мельница XIX века

Другая сложность в укрощении ветра состоит в том, что сила ветра постоянно меняется. В древности ветрякам, крылья которых напоминали паруса лодок, было трудно «подстраиваться» под разную скорость ветра. Эта проблема решилась в 1772 году, когда шотландский изобретатель заменил паруса на автоматически отрывающиеся и закрывающиеся щитки, похожие на жалюзи. При сильном порыве ветра давление на щитики превосходит силу пружины, и они открываются, давая ветру „дорогу“, а когда ветер стихает, щитки под действием пружины закрываются, что увеличивает поверхность крыльев, которые продолжают вращаться примерно с той же скоростью». С вращающимися крышами и саморегулирующимися крыльями, мельницы достигли своего расцвета к концу XIX века (рис. 6.2).

Первые шаги

К концу XIX века суммарная мощность всех мельниц в Европе достигала 1500 мегаватт. Их конструкция обладала всем необходимым, чтобы перейти к выработке электроэнергии и ветроагрегаты, производящие электричество, были изобретены в конце 19-го века.

По-видимому, идея витала в воздухе и практически одновременно ее стали реализовывать несколько энтузиастов из разных стран.

Первая машина, используемая для производства электроэнергии, была построена в июле 1887 г. профессором Джеймсом Блитом (James Blyth) из Глазго. Десятиметровая ВЭУ Блита была установлена в саду его загородного дома и использовалась, чтобы зарядить аккумуляторы освещения в этом доме.

С другой стороны Атлантики, в Кливленде (штат Огайо) Чарльзом Брюшем (Charles F. Brush) его машиностроительной компанией в 1887-1888 годах была спроектирована и построена машина, которая имела ротор 17 м в диаметре и была установлена на башне высотой 18 м (рис. 6.3,а).

В 1890-ых годах Поль Ла Кур (Poul la Cour) построил в Дании первую ветроэлектростанцию, а уже к 1908-му году там насчитывалось 72 станции мощностью от 5 до 25 кВт, крупнейшие из них имели высоту башни 24 м и роторы диаметром 23 м. (рис. 6.3.б).

В 1927 г. братья Джо и Марсель Якобс (Joseph Jacobs, Marcellus Jacobs) открыли фабрику Jacobs Wind в Миннеаполисе, чтобы выпускать ветрогенераторы мощностью 1,5...3 кВт для фермеров, которые не были присоединены к электрической сети (рис. 6.3.в). Это было первое в мире серийное производство, фирма существует и поныне.

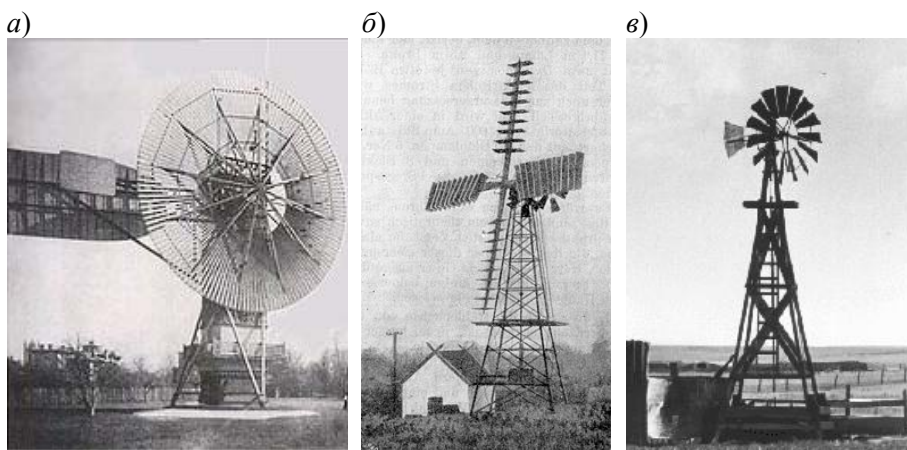


Рис. 6.3. Первые ВЭУ: а – Брюша, б - Поль Ла Кура, в -. фирмы Jacobs Wind

В России также заинтересовались возможностью выработки электроэнергии с помощью ветроустановок: в 1918 году ветряками занялся профессор В. Залевский, создавший теорию ветряной мельницы и сформулировавший несколько принципов, которым должна отвечать ветроустановка. В 1925 году профессор Н.Е. Жуковский разработал теорию ветродвигателя и организовал отдел ветряных двигателей в ЦАГИ.

Первые шаги ветроэнергетики еще не требовали разработки специальных башенных конструкций, потребность в них возникла при переходе к строительству более мощных ВЭУ. А пока использовались любые подходящие решения, включая, например, простейшие деревянные опоры (рис. 6.4).

Становление и развитие

Предшественником современных ВЭУ промышленного масштаба был разработанный в ЦАГИ под руководством Юрия Кондратюка действующий экспериментальный ветроагрегат в Балаклаве мощностью 100 кВт (рис. 6.5.а). Опорная конструкция ветродвигателя была построена по проекту В.Г. Шухова. ВЭУ с диаметром колеса 30 м и мощностью асинхронного генератора 100 кВт была на то время самым мощным в мире (мощность ВЭУ в Дании и Германии была в пределах 50-70 кВт с диаметром колеса до 24 м.).

а)



б)



Рис. 6.5. Разработки Ю.Кондратюка:
а – ВЭУ ЦАГИ в Балаклаве, б - проект ВЭУ на горе Ай Петри

Инженерный талант Кондратюка с блеском проявился в его последующих занятиях ветроэнергетикой. Оригинальные проекты мощных ветроэлектростанций (ВЭС) энергично поддержал нарком тяжелой промышленности С. Орджоникидзе. В 1936 г. в Крыму, на Ай-Петри началось сооружение грандиозной ВЭС по проекту Кондратюка. Два лопастных колеса, установленные на железобетонной трубчатой башне высотой 165 м, рассчитывались на электрическую мощность 12 тыс. кВт.

В 1937 г., вскоре после внезапной смерти Орджоникидзе, проект Крымской ВЭС закрыли, а отдел Кондратюка переключили на ветроустановки малой и средней мощности.

Первая реальная ветротурбина мегаватного класса была создана в 1941 году в США П.К. Путманом (Palmer Cosslett Putnam) и изготовлена компанией Моргана Смита (Morgan Smith). Для этой машины была запроектирована и изготовлена специальная решетчатая башня. Турбина Смита-Путмана мощностью 1,25 МВт (рис. 6.6) проработала 1100 часов и потерпела аварию из-за поломки лопасти, ремонт не состоялся из-за военных материальных трудностей. До повторения этого смелого эксперимента пришлось ждать приблизительно сорок лет.



Рис. 6.6. ВЭУ Смита-Путмана

Во время второй мировой войны ветроэнергетика практически не развивалась/. хотя маленькие ВЭУ использовались на немецких подводных лодках, чтобы перезарядить аккумуляторы, экономя при этом дизельное топливо.

В 1946 г. маяк и поселок на острове Insel Neuwerk были частично переведены на энергоснабжение от ВЭУ мощностью 18 кВт с диаметром ротора 15 метров, чтобы экономить на дизельном топливе. Эта установка работала в течение приблизительно 20 лет прежде, чем быть заменена подводным кабелем с материка

С 1956 до 1966 года работала станция d'Etude de l'Energie du Ventиль в Nogentle во Франции, на которой была установлена экспериментальная 800-киловаттная ветротурбина KVA (рис. 6.7).



Рис. 6.7. Французская ветротурбина в Nogent-le-Roi

В 1956 году в Дании Иоганнесом Жюлем (Johannes Juul) бывшим учеником Поль Де Кура была создана ветротурбина мощностью 200 кВт. Турбина работала до 1967 и была отреставрирована в середине 1970-ых по требованию НАСА. Эта трехлопастная машина вдохновила многих более поздних исследователей.

Весьма интенсивно работала группа добровольцев преподавателей и студентами так называемой школы Tvind, которые к 1978 году создали первую в мире ветротурбину мегаваттного класса с новым устройством лопастей, найденным с помощью немецких специалистов по аэродинамике. Установка была создана. Перед завершением работы над этим проектом разработчики высмеивались как "любители", но турбина была запущена, все еще работает сегодня и выглядит почти идентичной самым новым самым современным устройствам.



Рис. 6.8. Мегаваттная ветротурбина Tvind

Побудительным мотивом участников школы Tvind было то, что после нефтяного кризиса 1973 года они хотели установить независимое собственное производство энергии, но избежать строительства атомных электростанций. Большая часть команды добровольцев позже стали частью организации Tvind. Некоторые из участников и теперь - много лет спустя являются ведущими специалистами в датской промышленности ветротурбин. А тогда возникло много технологий, используемых и в современных ветротурбинах, что привело к становлению таких фирм как Vestas, Siemens и других.

Упомянутый нефтяной кризис побудил правительство Соединенных Штатов с 1974 до середины 1980-ых гг. работать с промышленностью с целью разработки технологии эффективного использования больших коммерческих ветротурбин. К решению этой проблемы было привлечено космическое агентство США (НАСА).

Было разработано 13 экспериментальных ветротурбин (рис. 6.8), эта научно-исследовательская программа ввела многие из техноло-

гий, которые используются и сегодня, включая: конструкции стальных башен в виде цилиндрической или конической оболочки, использование композитных материалов для конструкции лопастей, управление углом атаки лопасти и многое другое.

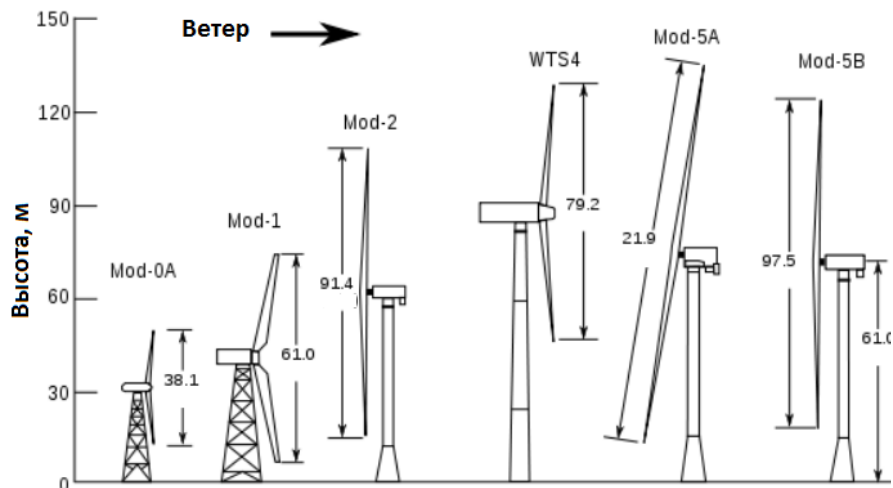


Рис. 6.8. Экспериментальные разработки НАСА

Результаты исследований НАСА в целом совпали с выводами Датских специалистов, которые во многом оставались законодателями ветроэнергетической моды.

Когда с 1980 до начала 1990-ых гг. цены на нефть упали почти втрое, многие из фирм-разработчиков оставили этот бизнес. Например, корпорация Боинга объявила, что они "планировали оставить рынок, потому что низкие цены на нефть делают ветряные мельницы для выработки электричества неэкономными".

Позже, в 1980-ых, Калифорния предоставила налоговые уступки для ветроэнергетики в целях финансирования усилий для использования энергии ветра. ВЭУ были собраны в большие ветростанции (windpark), такие, как Altamont Pass¹ (рис. 6.9), что делало их более конкурентоспособными.

¹ В настоящее время Алтамонт Пасс насчитывает 4930 ветротурбин общей мощностью 576 мегаватт.



Рис. 6.9. Ветропарк Altamont Pass в Калифорнии

Несмотря на приоритетные исследования в области ветроэнергетики, в 1960-1980-е годы энергетическая отрасль СССР была ориентирована на строительство крупных ТЭС, ГЭС и АЭС. Ветряки не выдержали конкуренции с электроэнергетическими гигантами, объединившимися в единую национальную сеть, и в конце 1960-х годов их серийное производство было закрыто.

Но время вносило свои коррективы, и в 1987 году вышло постановление Совмина СССР «Об ускоренном развитии ветроэнергетической техники в 1988-1995 годах». По нему предполагалось ввести к 1995 году 57 тысяч ветроустановок. При этом были предусмотрены государственные централизованные капитальные вложения на развитие производственной базы. Однако эти задания выполнены не были, хотя полностью вопрос с повестки дня не снимался. Минэнерго СССР предполагал построить экспериментальные системные ветростанции общей мощностью 58,5 МВт, одновременно велись работы по созданию ветроустановок 16, 30, 60, 100 и 250 кВт.

Но политический и экономический кризис 1990-х годов остановил эти работы. Не менее важной причиной явилось непонимание разработчиками того факта, что, в отличие от ракетной и авиастроительной практики, у них нет возможности и средств на изготовление конструкций, требующих длительной доводки при отсутствии сервисного обслуживания. Первые же поломки приводили к длительным

простоим что, в свою очередь, укрепляло скептическое отношение к ветроэнергетике в целом.

В 1990 году в Швеции была построена первая ветроустановка, которую рискнули разместить в море в 300 метрах от береговой линии. Она имела мощность 220 кВт и рассматривалась как экспериментальная.



Рис. 6.10. Оффшорная ветростанция Vindeby (Дания)

В 1991 году датчане построили уже первую оффшорную промышленную ветростанцию (рис. 6.10), открыв, таким образом, новое направление развития ветроэнергетики.

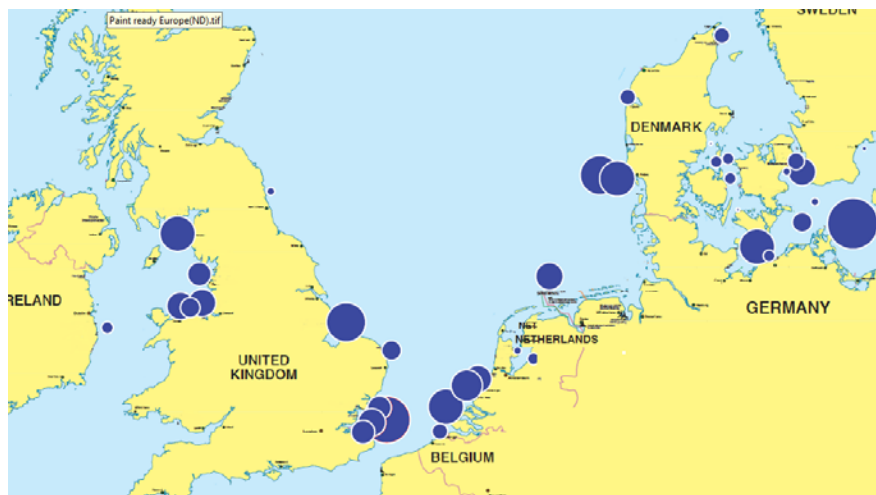


Рис. 6.11. Расположение европейских оффшорных ветроэлектростанций

К настоящему времени в Европе построено 26 оффшорных ветроэлектростанций с суммарной номинальной мощностью 76 МВт (рис. 6.11). Лидирует Великобритания с суммарной мощностью в 1.1 ГВт, за ней следует Дания (854 МВт), Нидерланды (249 МВт), Бельгия (195 МВт), Швеция (164 МВт), Германия (92 МВт), Ирландия (25 МВт), Финляндия (26 МВт) и Норвегия с 2.3 МВт.

Эволюция опорных конструкций

Все годы становления и роста ветроэнергетики сопровождалось неуклонным возрастанием мощности ВЭУ, которая определялась диаметром ветроколеса D и высотой расположения турбины H (обычно $H \approx D + 10$ м). Этот факт наглядно иллюстрирует рис. 6.12.

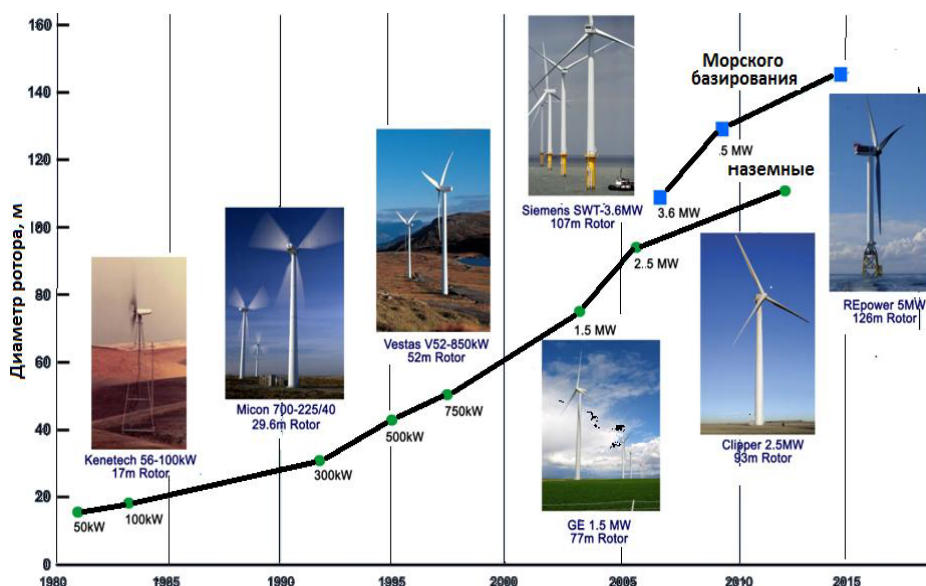


Рис. 6.12. Возрастание габаритов ВЭУ

Главной нагрузкой на опору является группа сил и моментов, передаваемых от работающей ветротурбины на вершину башни и вызываемых следующими причинами:

- аэродинамическими нагрузками на лопасти ВЭУ;
- инерционными и гироскопическими силами, возникающими при изменении режима работы или при изменении ориентации турбины;

- несбалансированностью лопастей и других движущихся элементов;
- изменчивостью ветрового потока по скорости и по направлению, включая турбулентные пульсации ветра;
- обледенением.

Из числа аэродинамических нагрузок основной является тянущая сила ротора. Эта нагрузка определяет размеры основных элементов башни, остальные нагрузки сказываются лишь на конструктивных решениях отдельных деталей и узлов.

Необходимо отметить, что внешние нагрузки от ВЭУ служат источником существенных вибраций элементов башни. Эти динамические воздействия реализуются, в основном, на частоте возбуждения, определяемой числом оборотов ротора, и дополнительной частоте, определяемой прохождением лопастей вблизи опоры. За расчетный срок эксплуатации реализуется более ста миллионов циклов переменных нагружений с амплитудами динамических напряжений различной величины и различным относительным количеством проявлений, что требует внимательного отношения к вопросам усталости.

Все упомянутые обстоятельства самым существенным образом влияли на выбор конструктивных решений башен для ВЭУ. В практике применяются *сквозные и трубчатые башни* (рис 6.13).

Конфигурация поясов сквозных башен обычно самая простая, иногда используется один перелом для организации расширенной нижней части, с целью облегчения фундамента. В последние годы сквозные конструкции явно уступают свое место трубчатым башням.

Трубчатые башни чаще всего проектируются также простой слабоконической формы или имеют ступенчато-цилиндрическое очертание. Для трубчатых башен диаметр башни в основании обычно намного меньше ширины сквозной опоры аналогичного назначения. Это вызвано как стремлением к уменьшению ветрового напора на конструкцию башни, так и тем, что здесь чаще всего используется общий фундамент.

Из соображений транспортировки конструкций габаритный диаметр оболочечной башни в большинстве случаев не может превышать 4,3 м, а вес монтажной единицы должен быть меньшим 40-50 тонн. Ограничение диаметра значением 4,3 м приводит к необходимости использовать толщины до 36 мм, вес башни возрастает с 110 тонн до 150 тонн.

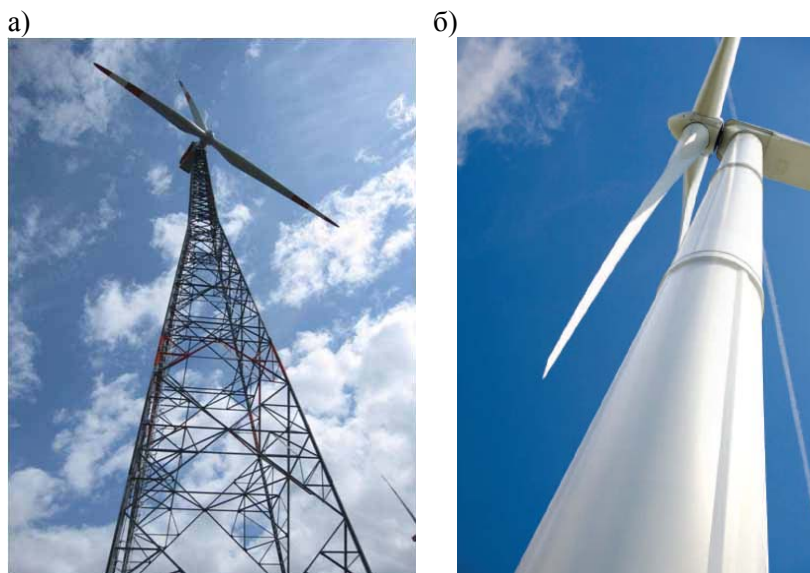


Рис. 6.13. Опоры ВЭУ: *а* – сквозная башня ветротурбины мощностью 2,5 МВт, *б* – трубчатая опора высотой 100 метров

При большой высоте башня подразделяется на секции, которые соединяются через фланцевые стыки (рис. 6.14).

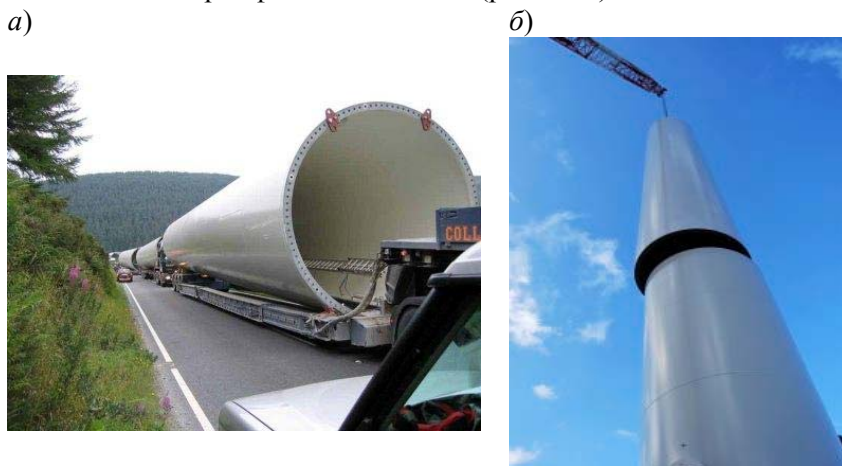


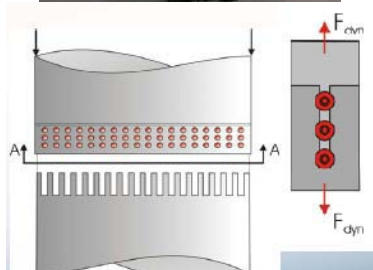
Рис. 6.14. Секции трубчатой башни: *а* – при транспортировке, *б* – на монтаже

С возрастанием высоты башен все труднее реализовать стык секций на фланцах, появляются конструкции стыков на срезных болтах

(рис. 6.15,*а*). Кроме того, ограничение габарита становится все более стеснительным, и появляются конструктивные решения скорлупчатого типа, в которых предусматриваются не только поперечные, но и продольные болтовые соединения (рис. 6.15,*б*).

Конструкция верхней части опоры определяется условиями примыкания ВЭУ к башне. В самой верхней части башни (оголовнике) размещаются отверстия для крепежных болтов, при этом для обеспечения необходимой точности и плотности примыкания корпуса ВЭУ оголовник подвергают механической обработке. Оголовник непосредственно воспринимает интенсивные динамические воздействия, для некоторых типов ВЭУ имеются данные о появлении здесь усталостных трещин. Поэтому к сварным швам оголовника должны быть предъявлены повышенные требования в части обеспечения качества, часто здесь применяется стопроцентный контроль швов физическими методами.

а)



б)



Рис 6.15 Новые конструктивные решения башен ВЭУ большой высоты

В этой же верхней части часто располагается площадка, с которой эксплуатационный персонал производит осмотр и текущий ре-

монт ответственного узла крепления лопастей к ступице и механизмов поворота ВЭУ по ветру. С целью сокращения *аэродинамической тени башни* внешняя площадка башни иногда проектируется без перил, а для обеспечения безопасности персонала предусматриваются скобы для крепления карабина верхолазного пояса.

Для оболочечных опор часто внешняя площадка не делается, что упрощает решение проблемы безопасности. Если же внешняя площадка имеется, то необходим лаз для выхода на нее. В местах расположения лазов в оболочке необходимо предусмотреть усиление контура отверстия для компенсации поперечного сечения, для чего отверстия лазов обрамляются патрубками, служащими одновременно для расположения деталей крепления дверей, а иногда укрепляется еще и дополнительными манжетами или вставкой участка оболочки из более толстого листа. Контуры отверстий, вставок и манжет выполняются овальной формы для уменьшения концентрации напряжений у выреза. Это особенно важно для верхнего лаза, где в большей степени ослаблено поперечное сечение (ввиду меньших габаритных размеров оболочки при одинаковых габаритах лазов), и к тому же в этой зоне более интенсивно влияние вибраций.

Имеются конструкции опор, где кроме верхней площадки предусматривается еще и дополнительная промежуточная площадка в уровне, позволяющем производить осмотр концов лопастей, поскольку именно эта часть лопасти, имеющая наибольшую линейную скорость, является наиболее повреждаемой.

Вытяжные трубы

Одним из типов инженерных сооружений, с помощью которых отходы производства с остаточным содержанием вредных веществ выбрасываются на значительной высоте, являются вытяжные башни.

В античном мире использовались трубы внутри стен здания для отвода газов пекарен, однако настоящие трубы появились в Европе только в XII веке.

Возникновение дымовых труб неразрывно связано с отопительными сооружениями. Наиболее простое из них — костёр, окружённый камнями. Такая отопительная «конструкция» позволяла в древности погреться у огня, приготовить нехитрую еду, но не более. Вопросом, как же завестись теплом про запас, люди стали задаваться гораздо позже, когда начали кочевать все дальше и дальше на север. К примеру, в Уссурийской зоне, по свидетельствам В. К. Арсеньева,

писателя-путешественника, исследовавшего те края, жилища поселенцев из Кореи обогревались весьма интересными дымоходными каналами, которые были проложены в полу дома и проходили в жилых зонах, обогревая их. Выходили продукты сгорания наружу через дуплистое дерево, заменявшее им внешнюю часть дымовой трубы.

А на Руси ранее отопление велось вообще без использования дымоходных труб — по-чёрному. До XVII столетия даже в условиях города у всех сословий печи отапливались таким способом. Данный метод отопления жилого помещения был небезопасен, поскольку в доме могли скапливаться вредные для человека угарные газы.

Промышленные дымовые трубы появились в конце XVIII века. Они являются неотъемлемой частью комплекса сооружений ряда предприятий металлургической, химической и других отраслей промышленности с момента их возникновения. Назначение и условия работы этих сооружений вследствие непрерывного роста промышленности и совершенствования технологии претерпевали существенные изменения, что накладывало определенные, меняющиеся со временем требования к их конструкции в отношении как применявшихся материалов, так и конструктивных форм.



Рис. 6.16. Кирпичная труба



Рис.6.17. Металлическая труба

Вначале промышленные трубы служили только для создания тяги, обеспечивающей определенные режимы процессов горения и другие химические реакции, используемые в промышленности. Эти трубы возводили из обыкновенного красного кирпича (рис. 6.16).

В середине XIX века появляются металлические трубы (рис. 6.17). Однако отсутствие эффективной защиты от коррозии и высокотемпературный нагрев отходящими газами значительно сокращали сроки службы этих труб по сравнению с кирпичными. Вот почему практическое использование получили металлические трубы малого диаметра и высотой до 30 м (свободно стоящие или на оттяжках).

Высота кирпичных труб не удовлетворяла практическим требованиям. В начале XX в. появился новый, более прочный материал — железобетон, который и стал использоваться для возведения труб.

Применение железобетона значительно снизило стоимость строительства вытяжных труб и увеличило их высоту по сравнению с кирпичными. Вследствие этого в 20—30-х гг. XX в. в Европе и США и в 30—40-х гг. в СССР начало осуществляться строительство большого числа железобетонных труб значительной высоты (рис. 6.18).



Рис. 6.18. Железобетонная труба

Появились железобетонные трубы с разного рода защитными покрытиями внутренней поверхности ствола и трубы с внутренним стволом из коррозиестойчивых материалов, так называемая конструкция «труба в трубе». В этом сооружении наружный самонесущий ствол предназначен для восприятия ветровых нагрузок, внутренний

служит непосредственно технологическим целям. Внутренний ствол может быть самонесущим, либо подкрепленным наружным стволом.

Высокая стоимость этих типов вытяжных сооружений, чрезвычайно затрудненный надзор во время эксплуатации и трудоемкий ремонт определили поиск новых технических решений. Одним из таких решений явилась экспонировавшаяся на Строительной выставке в Москве в 1955 г. стальная башня с подвешенным внутри нее газоотводящим стволом из деревянной клепки, обработанной антипиренами и химически стойким лаком. Назначение сооружения — эвакуация газов, выделяющихся при производстве искусственного волокна.

В дальнейшем сооружения подобного типа со стальной несущей башней и газоотводящими стволами из материалов, стойких по отношению к отводимым газам, получили название «вытяжные башни». Строительство их получило широкое распространение, а конструктивные решения были весьма разнообразными.



Рис. 6.19. Конструктивные решения стальных вытяжных труб

В конструкциях таких башен можно выделить три основных решения:

- в виде сплошностенчатой свободностоящей несущей оболочки с футеровкой внутри, снаружи или без нее;
- в виде решетчатого несущего каркаса, поддерживающего один или несколько газоотводящих стволов (рис. 6.19);

- в виде стальной оболочки с подвешенными внутри нее газоотводящими стволами из коррозионно-стойкого материала — нержавеющей стали, стеклопластика и др. (рис. 6.20).



Рис. 6.20. Стальная оболочка с внутренними газоходами

Секционные металлические дымовые трубы собирают из сборных металлических секций заводского изготовления. Металлические дымовые трубы могут быть самонесущими. Если труба не является самонесущей, секции трубы крепят к стенам, рамам, фермам или иным несущим конструкциям здания (рис. 6.21).



Рис. 6.21. Труба, прикрепленная к каркасу здания



Рис. 6.22. Групповая установка вытяжных труб

Опоры линий электропередачи (ЛЭП)

Воздушные линии (ВЛ)

Первым случаем передачи электрического сигнала на расстояние считается эксперимент, проведенный в середине 18 века аббатом Ж.А. Нолле: две сотни монахов Картезианского монастыря по его указанию взялись руками за металлический провод и встали в линию длиной более мили. Когда любознательный аббат разрядил электроконденсатор на провод, все монахи тотчас убедились в реальности электричества, а экспериментатор — в скорости его распространения. Разумеется, эти двести мучеников не отдавали себе отчета в том, что образовали собой первую в истории линию электропередачи.

Первые эксперименты по созданию промышленной линии электропередачи проводились в конце XIX века. Так в 1874 году инженер Федор Пироцкий предпринял эксперимент по передаче тока, где в качестве проводника были использованы рельсы железной дороги: один рельс был в роли прямого провода, второй – обратного. Сегодня по этому принципу работает метро.

В это время умы многих ученых в мире были заняты проблемой передачи тока на большие расстояния (при передаче тока по проводам потери составляли до 75%).

Долгое время шла острая дискуссия об использовании постоянного тока (Эдисон) или переменного тока (Тесла). Победила последняя точка зрения, и первые в США крупномасштабные гидроэлектрические генераторы переменного тока были установлены в 1895 на Ниагарском водопаде. Статуя Никола Теслы стоит вблизи Ниагарского водопада и сегодня, как дань его вкладу.

Первая передача трехфазного переменного тока с напряжением 25 кВ имела место в 1891 г. во время международной выставки электричества во Франкфурте. Созданная Михаилом Доливо-Добровольским и Оскаром фон Миллером линия передачи соединила Лауффен-на-Неккаре и Франкфурт-на-Майне на расстоянии 175 км. А потеря тока снизилась до 25%, после этого мировая общественность признала, что проблема передачи тока на большие расстояния решена.

Дальнейшее развитие системы ВЛ шло по пути наращивания напряжения. Так первая линия передачи электроэнергии в США в 1889 году работала на напряжении 4 кВ. К 1914 г. пятьдесят пять систем передачи работало на напряжении большем, чем 70 кВ, и самое высокое напряжение, используемое тогда, составляло 150 кВ.

В начале 1920-ых годов в Калифорнии была построена линия в 220 кВ, транспортирующая энергию от гидроэлектростанций в Сьерра-Неваде к Сан-Франциско. В апреле 1929 года была закончена первая линия на 220 кВ в Германии. Мачты этой линии были разработаны для возможной модернизации к напряжению 380 кВ. Однако первая передача в 380 кВ в Германии была реализована лишь в 1957 году.

Первая в мире линия электропередачи на 380 кВ была построена в Швеции в 1952 году, а в 1965 году имела место первая передача экстремально высокого напряжения в 735 кВ на ЛЭП Гидро-Квебек в Канаде. В 1982 г. первая линия электропередачи в 1200 кВ была построена в Советском Союзе на линии Алтай-Экибастуз (рис. 6.23).



Рис. 6.23. Опоры ЛЭП Алтай-Экибастуз.

Конструкции опор ЛЭП

Опоры для строительства воздушных линий электропередачи используются уже более 100 лет. Все эти годы конструкции опор ЛЭП непрерывно совершенствовались. Каждый этап истории развития электроэнергетики выдвигает свои требования к электросетевому строительству в целом и к конструкциям ЛЭП в частности.

Линии электропередач вначале строились на деревянных столбах. История строительства ЛЭП на деревянных опорах начинается с конца XIX века. Связано это с электрификацией промышленности. Основная задача, которая решалась на этом историческом этапе - связь электростанций с промышленными районами. Напряжения были небольшими, как правило до 35 кВ, задачи объединения в сети не вы-

двигалось. В этих условиях задачи легко решались с помощью деревянных одностоечных и П-образных опор ЛЭП (рис. 6.24).



Рис. 6.24. Деревянная П-образная опора

Металлические опоры ЛЭП начали применяться по мере увеличения напряжения, утяжеления провода. В России первая в истории линия на металлических опорах ЛЭП появилась в 1925 году - двухцепная ВЛ 110 кВ Шатура - Москва.

По конструктивному решению ствола стальные опоры могут быть отнесены к трем основным схемам — башенным (одно- или многостоечным), порталным или вантовым, по способу закрепления на фундаментах — к свободностоящим опорам и опорам на оттяжках, по способу соединения элементов разделяются на сварные и болтовые. Также стальные опоры делятся на опоры гибкой конструкции и опоры жёсткой конструкции.

Металлические опоры изготавливаются как из стального уголкового проката (применяется равнобокий уголок), так из гнутого стального профиля постоянного и переменного сечения (это сочетает в себе преимущества конструкций стальных многогранных опор ЛЭП и стальных решетчатых опор башенного типа), кроме того, высокие переходные опоры могут быть изготовлены из стальных труб.

В зависимости от способа подвески проводов опоры делятся на две основные группы:

- опоры промежуточные, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах, расположенных внизу вертикальной гирлянды изоляторов;

- опоры анкерного типа, служащие для натяжения проводов; на этих опорах провода закрепляются в натяжных зажимах, прижимающих к горизонтальной гирлянде изоляторов.

Эти виды опор делятся на следующие типы, имеющие специальное назначение.

Промежуточные опоры устанавливаются на прямых участках трассы ВЛ, предназначены только для поддержания проводов и тросов и не рассчитаны на нагрузки от тяжения проводов вдоль линии. Обычно составляют 80—90 % всех опор ВЛ.



Рис. 6.25. Промежуточная опора

Угловые опоры устанавливаются на углах поворота трассы ВЛ, при нормальных условиях воспринимают равнодействующую сил натяжения проводов и тросов смежных пролётов, направленную по биссектрисе угла, дополняющего угол поворота линии на 180° . При небольших углах поворота (до $15\text{—}30^\circ$), где нагрузки невелики, используют угловые промежуточные опоры. Если углы поворота больше, то применяют угловые анкерные опоры, имеющие более жёсткую конструкцию и анкерное крепление проводов.



Рис. 6.26. Угловая опора

Анкерные опоры устанавливаются на прямых участках трассы для перехода через инженерные сооружения или естественные преграды, воспринимают продольную нагрузку от тяжения проводов и тросов. Их конструкция отличается жесткостью и прочностью.



Рис. 6.27. Анкерная опора

Концевые опоры — разновидность анкерных и устанавливаются в конце или начале линии. При нормальных условиях работы ВЛ они

воспринимают нагрузку от одностороннего натяжения проводов и тросов.



Рис. 6.28. Концевая опора



Рис. 6.29. Специальная опора — переход к подземной кабельной линии



Рис. 6.30. Специальная опора — пересечение воздушных линий

Специальные опоры: транспозиционные — для изменения порядка расположения проводов на опорах; ответвительные — для устройства ответвлений от магистральной линии; перекрёстные — при пересечении ВЛ двух направлений; противоветровые — для усиления механической прочности ВЛ; переходные — при переходах ВЛ через инженерные сооружения или естественные преграды.

Новые веяния

Много лет опоры ЛЭП конструировались как четырехгранные башни сквозной конструкции из одиночных уголков, снабженная траверсами для крепления проводов и грозозащитных тросов. Менялась конфигурация системы траверс и рисунок решетки, но основная статическая схема свободностоящей башни оставалась неизменной. Именно такого типа опоры показаны на рисунках 6.25...6.30.

Лишь в середине XX века появились конструкции нового типа: порталные и V-образные опоры на оттяжках (рис. 6.3.1, 6.32) и опоры мачтового типа (рис. 6.33).

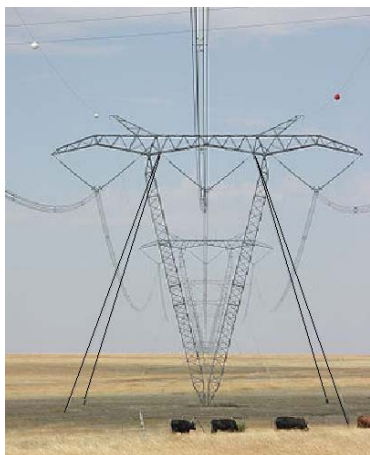


Рис. 6.31. V-образная опора на оттяжках



Рис. 6.32. Портальная опора на оттяжках

В шестидесятых годах прошлого столетия были предложены полимерные изоляторы, которые пришли на смену гирляндам фарфоровых и стеклянных изоляторов, на протяжении многих десятилетий надежно служивших в сфере энергетики. Использование полимерных изоляторов позволило отказаться от конструкции верхней траверсы у V-образной опоры (рис. 6.34), что заметно снизило расход металла.



Рис. 6.33. Мачтовая опора

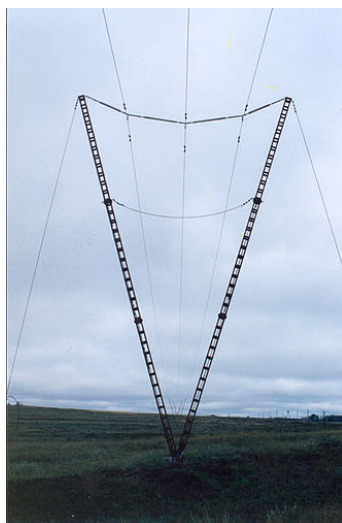


Рис. 6.34. Опора с полимерными изоляторами

На протяжении последних десятилетий в электросетевом строительстве всё чаще стали применять опоры ЛЭП из многогранных гнутых стоек. Такие конструкции появились ещё в конце 50-х годов прошлого века. Так, в 1957 году в США был построен восьмикилометровый опытный участок ЛЭП напряжением 115 кВ с применением стальных конических опор. Опоры на их базе прозвали «poles».

В настоящее время использование опор такого типа (рис. 6.35) стало массовым. Их увеличенная металлоемкость с лихвой перекрывается резким упрощением монтажа и, главное, сокращением площади землеотвода.



Рис. 6.35. Многогранная опора закрытого профиля

Опоры из многогранных гнутых стоек имеют хорошие эксплуатационные характеристики: высокая надежность, отсутствие катастрофических разрушений при обрыве провода, стабильность характеристик опор на протяжении всего срока эксплуатации, низкие текущие затраты по эксплуатации линий электропередачи.

Можно отметить простоту и высокую скорость монтажа многогранных опор. Как правило, монтаж одной опоры занимает 0,5 - 2 часа. В США на установку одной опоры производства фирмы «Майер Индастриз» при хороших погодных условиях уходит около 15 минут.

Переходные опоры

Практически все современные конструкции опор позволяют строить линию электропередачи вдоль любого маршрута и воспринимать любые нагрузки, включая самые чрезвычайные (землетрясения,

сложный рельеф, и др.), в том числе и пересечения водных преград. Одним из первых примеров решения такого рода задач был сооруженный в 1929 году переход ЛЭП через Оку с использованием гиперболоидных опор по проекту В. Г. Шухова (рис. 6.36).

Впечатляющим примером может служить пересечение Мессинского пролива двухцепной ЛЭП на 220 кВ, которое было реализовано в 1955 году в сейсмической местности на опорах высотой 224 метра при 3600-метровом пролете между опорами. Это пересечение в течение долгого времени представляло мировой рекорд.



Рис. 6.36. Гиперболоидная опора перехода ЛЭП через Оку



Рис. 6.37. Переходная опора через Янцзы.

50 лет спустя в рекордный список попало пересечение реки Янцзы, самой длинной и самой порывистой реки в Китае. Конструкция переходной опоры представляет собой башню высотой 346 метров и весом 4200 тонн.

В настоящее время самые высокие опоры установлены на переходе ЛЭП-220 через морской пролив на архипелаг Чжоушань в Китае, конкретнее - на острове Дамао. Высота обеих опор составляет 370

метров, каждая имеет вес 5999 тонн. Воздушный переход, построенный в 2009-2010 годах, имеет пролет 2700 м.

Очерк седьмой. КОНСТРУКЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Конструкции радиотелескопов занимают промежуточное положение между машинами (механизмами) и традиционными строительными конструкциями, тяготея по сложности изготовления и допускам к первым, а по конструктивной форме и размерам — ко вторым.

Несмотря на то, что конструкции радиотелескопов возникли относительно недавно, история их создания и развития уже успела пройти несколько этапов, некоторые из которых являются очень показательными.

Сами по себе конструкции радиотелескопов подразделяются на несколько групп, среди которых с конструкторско-механической точки зрения можно отметить:

- конструкции поворотных зеркальных систем;
- неподвижные антенные системы;
- космические радиотелескопы.

В этой классификации отсутствуют различия по радиотехническим признакам, что является вполне естественным для книги, посвященной металлическим конструкциям.

История радиотелескопов берёт своё начало в 1931 году, с экспериментов Карла Янского на полигоне фирмы Bell Telephone Labs. Для исследования направления прихода грозových помех он построил специальную однонаправленную антенну, размеры которой составляли 30,5 м в длину и 3,7 м в высоту (рис. 7.1). Исследуя записи сигналов, полученных антенной, Карл Янский пришел к заключению, что их источником является центральная область нашей галактики, причём наибольший отклик получается, когда антенна направлена на центр Млечного Пути.

Янский сознавал, что прогресс в радиоастрономии потребует антенн больших размеров с более острыми диаграммами, которые должны быть легко ориентируемы в различных направлениях. Он сам предложил конструкцию параболической антенны с зеркалом 30,5 м в диаметре для работы на метровых волнах. Однако его предложение не получило поддержки.



Рис 7.1. Копия радиотелескопа Янского



Рис. 7.2. Радиотелескоп Гроута Ребера

В 1937 году Гроут Ребер, радиоинженер из Уэтона (США, штат Иллинойс) заинтересовался работой Янского и сконструировал в заднем дворе дома своих родителей антенну с параболическим рефлектором диаметром 9,5 м (рис. 7.2). Эта антенна была меньше, чем у Янского, но работала на более коротких волнах, и её диаграмма направленности была значительно острее. Весной 1939 года Ребер обнаружил на волне 1,87 м (160 МГц) излучение с заметной концентрацией в плоскости Галактики и опубликовал некоторые результаты. Совершенствуя свою аппаратуру, Ребер предпринял систематический обзор неба и в 1944 году опубликовал первые радиокарты небосвода на волне 1,87 м.

После Второй мировой войны учёными разных стран были сделаны существенные технологические улучшения в области радиоастрономии. Таким образом начался расцвет радиоастрономии, который привёл к освоению миллиметровых и субмиллиметровых длин волн, позволяющих достичь значительно больших разрешений. Доставшаяся от военных времен, в основном радиолокационная, техника довольно скоро перестала отвечать требованиям чувствительного приема и высокого разрешения. И вся дальнейшая история развития радиоастрономии, как и конструктивных решений радиотелескопов, связана с увеличением этих основных параметров, которые определяются двумя факторами: длиной волны, которую могут использовать радиотелескопы, и их генеральными размерами.

Радиотелескопы с поворотным рефлектором

Основным элементом этих конструкций является отражающее зеркало, как правило, имеющее форму параболоида (рис. 7.3), в фокусе которого размещается излучатель радиоволн или вторичный отражатель (контррефлектор).

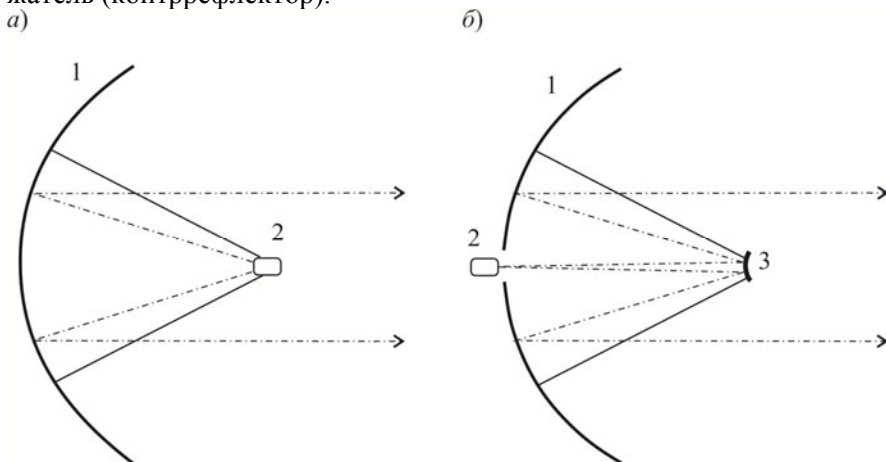


Рис. 7.3. Зеркальная система: а - с фокусным облучателем, б - с контррефлектором (схема Грегори); 1- зеркало, 2 - излучатель, 3 -контррефлектор

Разработка антенных устройств зеркальной системы поставила перед конструкторами новую и весьма сложную проблему точности. Суть ее состояла в том, что было необходимо создать и в последующем сохранять форму отражающей поверхности с отклонениями, не превышающими $1/16$ длины волны. При работе на сантиметровых волнах это означает, что допуски имеют порядок долей миллиметра. Строители, привыкшие к работе с допусками и перемещениями порядка $1/1000$ генерального размера, должны были перейти к величинам порядка $1/10^5 - 1/10^7$. Кроме того, при наклонах рефлектора его деформации также не должны были превышать $1/16$ длины волны, что во многих случаях составляло доли миллиметра.

Создать практически конструкцию с такими параметрами возможно лишь при использовании различных методов компенсации переменных деформаций каркаса. Указанная компенсация реализуется либо естественным путем за счет выбора жесткости и массы соответствующих опор, либо принудительно с помощью механизмов автоматического управления деформированным состоянием конструкции и положением облучателя.

Однако, проблема прецизионности возникла не сразу и в первых радиотелескопах, имевших относительно небольшие размеры и работавших в метровом диапазоне радиоволн конструкторы не сталкивались с требованиями сверхвысокой точности.

Радиоастрономы быстро осознали, что большие рефлекторные антенны обеспечивают хорошую перспективу для развития исследований на дециметровых и сантиметровых волнах. Но нужно было обеспечить высокую точность поверхности отражателя при максимально возможных размерах рефлектора. На решение этой задачи были нацелены коллективы разработчиков.

Здесь полезно рассмотреть несколько примеров конструктивных решений, каждое из которых определило определенный этап в развитии конструктивной формы.

Радиотелескоп обсерватории Джодрелл Бэнк

Особую роль в разработках радиотелескопов сыграл Бернард Лавелл, который в обсерватории «Джодрелл Бэнк» (Чешир, Северо-Западная Англия) в конце 1940-х построил транзитный телескоп диаметром 66 м. Этот телескоп смотрел только вверх, и следующим логическим шагом было построить телескоп, который бы мог смотреть на все части неба. Хотя транзитный телескоп был спроектирован и построен самостоятельно, для разработки полностью управляемого (поворотного) телескопа первостепенной задачей было найти инженера готового сделать эту работу. Им оказался Чарльз Хазбенд.

Основой вертикального поворотного механизма стали два пятнадцатидюймовых подшипника, снятых с орудийных башен списанных военных кораблей 2-ой мировой войны и остальные части поворотного механизма разрабатывались под эти подшипники. Хазбенд представил чертежи поворотного телескопа в 1951 году, в марте 1952 года чертежи были утверждены.

Зеркало этого радиотелескопа опирается на две решетчатые башни, соединенные понизу решетчатой фермой и передвигающиеся на тележках по кольцевому пути. Соединительная ферма имеет центральную опору – ось вращения по азимуту, вращение в вертикальной плоскости (по углу места) реализуется поворотом чаши.

Строительство началось 3 сентября 1952 года. Фундамент телескопа был завершен 21 мая 1953 года, но из-за требований точности при укладке рельс фундамент был оставлен на усадку до середины апреля 1954 года. Центральная ось была поставлена на место 11 мая 1954 года, последняя ходовая тележка в середине апреля 1955 года. "Первый свет" телескоп увидел 2 августа 1957 г., сделав сканирование Млечного Пути в диапазоне 160 МГц.

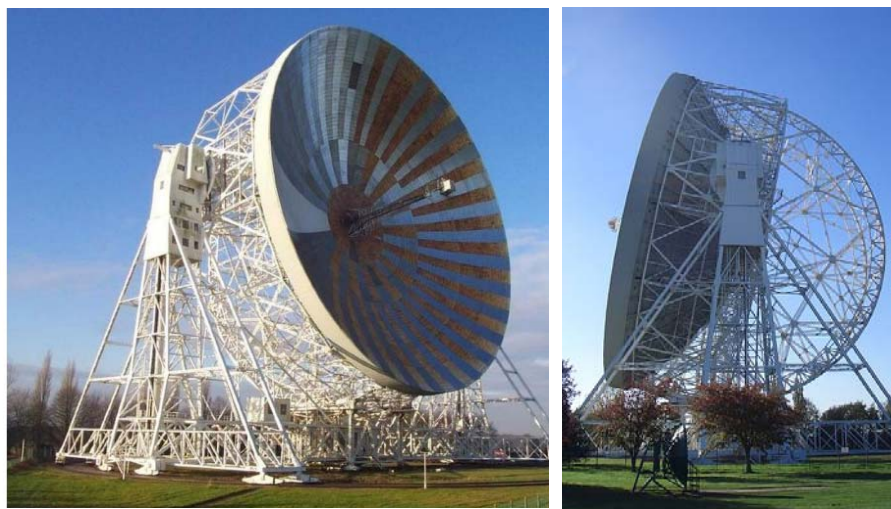


Рис. 7.4. Радиотелескоп «Лавелл»

На момент постройки в 1957 году, этот телескоп с диаметром зеркала 76,2 метра (масса телескопа 3200 т, масса зеркала: 1500 т) являлся самым большим полноповоротным радиотелескопом в мире (рис. 7.4). Изначально он был известен просто как «Радиотелескоп Джодрелл Бэнк»; в 1961 году после реконструкции был переименован в телескоп «Mark 1», в 1987 году был переименован в радиотелескоп «Лавелл».

Радиотелескоп РТ-22 ФИАН

Уже в первые годы становления радиоастрономии остро встал вопрос об освоении диапазона миллиметровых и сантиметровых волн. В 1951 г. по инициативе ФИАН Академии наук СССР двум советским министерствам было поручено подготовить предложения о создании в СССР с участием промышленных предприятий больших радиотелескопов для службы Солнца, наблюдения за радиоизлучением Солнца и других космических источников радиоизлучения на сантиметровых и миллиметровых волнах.

В декабре 1952 разработка эскизного проекта радиотелескопа с параболическим рефлектором диаметром 16 м была возложена на ФИАН. Научным руководителем работ назначен А.Е. Саломинович, главным конструктором – П.Д. Калачев.

По результатам эскизного проектирования было решено увеличить диаметр зеркала радиотелескопа до 22 м и создать радиотелескоп, известный теперь как РТ-22 ФИАН (рис. 7.5.а).

В научно-техническом плане было необходимо решить очень сложную, не имеющую прецедентов, задачу создания зеркала антенны диаметром 22 метра, работающую на миллиметровых волнах, т.е. с точностью поверхности в доли миллиметра. В мире в это время существовал только один радиотелескоп, работающий на миллиметровых волнах, но его диаметр составлял всего 4 метра.

П.Д. Калачев предложил принципиально новое оригинальное конструкторское решение — разделение функций обеспечения жесткости и точности рефлектора. Жесткость обеспечивалась несущим силовым каркасом сравнительно малой точности. Точность отражающей поверхности радиотелескопа достигалась креплением рефлектора на каркасе на регулируемых по высоте установочных опорах (шпильках), выставляемых по шаблону с требуемой точностью отражающей поверхности.

а)



б)

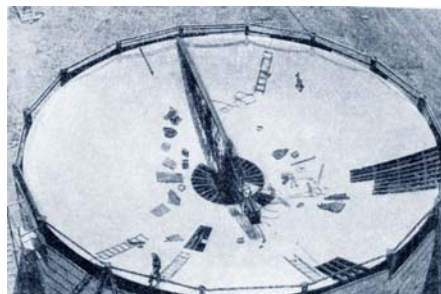


Рис.7.4. Радиотелескоп РТ-22 ФИАН: а - общий вид; б - контроль точности поворотным шаблоном

С февраля 1954 г. ФИАНом, совместно с рядом организаций и предприятий министерств, выполнялось техническое и рабочее проектирование радиотелескопа. Создавалась кооперация ряда промышленных предприятий: Ленинградский Металлический завод, ЦНИИ-АГ, НИИ-17. Когда чертежи на опорно-поворотное устройство по-

ступили в конструкторский отдел Ленинградского Металлического завода, местные конструкторы обратили внимание на большое сходство этой системы с конструкцией поворотных устройств изготовленных ранее и неиспользованных орудийных башен главного калибра со списанного с вооружения линейного корабля, которая представляла собой гигантский "шарикоподшипник" диаметром 10 метров. Использование готовой конструкции экономило время и средства¹.

На первом этапе с помощью шаблона производилась прецизионная (с точностью 0,1 мм) установка на каркасе рефлектора 32 000 регулируемых стоек. После выставки всех стоек на них были закреплены предварительно отштампованные, с приданием требуемой формы, листы обшивки. Заключительная проверка отражающей поверхности была выполнена с помощью вращающегося шаблона (рис. 7.5.б), а окончательная доводка зеркала путем повторной регулировкой высоты стоек и выборочной шабровкой поверхности.

Характерной особенностью работ, подчеркивающих их прецизионность, являлся ежедневный контроль и учет влияния изменения окружающей температуры. В результате была достигнута точность создания поверхности 0.4 мм.

Радиотелескоп введен в эксплуатацию в 1959 году, на то время он был самым точным в мире, а принцип конструктивного отделения функций прочности (силовой каркас) и точности (регулируемые щиты отражателя) стал практически повсеместным конструкторским приемом.

Эффельсбергский радиотелескоп

Эффельсбергский 100-метровый радиотелескоп расположен в 1,3 км севернее деревни Эффельсберг возле города Бад-Мюнстерайфель в Германии и принадлежит Радиоастрономическому институту Макса Планка. Построен в 1972 году и в течение 29 лет был крупнейшим в мире, пока не был построен радиотелескоп Грин-Бэнк с эллиптическим зеркалом размером по осям 100×110 м.

При создании этого радиотелескопа была поставлена задача получить точность поверхности 1 мм. Это определило необходимость использования абсолютно новых путей решения задачи. Речь шла об

¹ Другую башню предполагали использовать для 22-метрового радиотелескопа Крымской обсерватории в Симеизе. Башню для нее погрузили на баржу и она прибыла в Ялту, где несколько задержалась из-за штормового предупреждения. Затем проследовала... мимо Голубого залива в Евпаторию, где сооружался Центр дальней космической связи (см. далее).

отказе от классического метода строительства рефлектора, который был использован, например, при создании Марка I.

К этому моменту было известно теоретическое решение проблемы конструирования больших рефлекторов с упругой деформацией, предложенное Себастьяном фон Гёрнером (Sebastian von Hoerner) и основанное на понятии гомологии.

Сущность этого способа (см. рис. 7.6) заключается в том, что проектируется конструкция, у которой гравитационные деформации точек исходной параболической поверхности отражателя 1, хотя и происходят беспрепятственно до положения 2, но располагаются вблизи от некоторого другого, несколько иначе ориентированного в пространстве и имеющего несколько отличное фокусное расстояние параболоида 3. Изменением положения облучателя (переносом из точки 4 в точку 5) компенсируются большие деформации 1-2 и радиотелескоп работает как при деформациях 2-3, требуя проведения еще некоторой корректировки его направленности. Таким образом, появляется возможность снятия ограничений на перемещения и перенесения этих ограничений на закон деформирования конструкции.

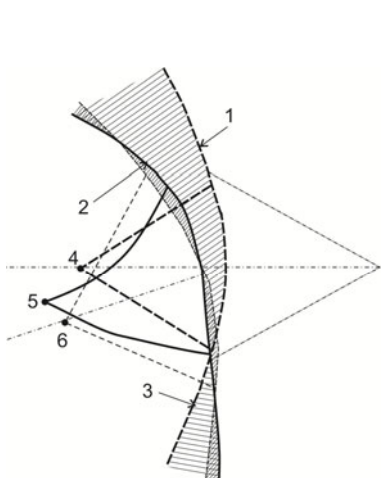


Рис. 7.6. Гомологическая деформация

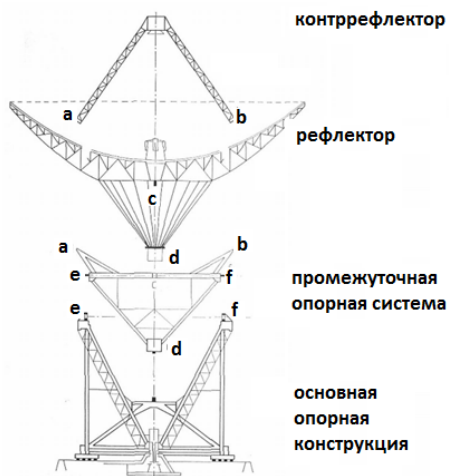


Рис. 7.7. Принципиальная схема конструкции

Отличительной особенностью конструктивной схемы было введение между несущей конструкцией отражателя и основной опорной конструкцией промежуточной опорной системы (рис. 7.7), жесткости элементов которой подбирались таким образом, чтобы реализовать

принцип гомологичности. На это решение ее автору Г. Альтману (Helmut Altmann) был выдан германский патент 1466013 и американский патент 3438039.

При конструкции 100-метрового телескопа серии расчетных проверок и изменений жесткостных параметров приводили постепенно к теоретическому оптимуму гомологичной деформации. Из-за тогдашней малой мощности компьютеров расчеты могли проводиться только для отдельных секторов конструкции. Позже более детальные расчеты деформации с улучшенным компьютерным обеспечением подтверждали первоначальные результаты.

Радиотелескоп строился с 1968 по 1971 год и был открыт 1 августа 1972 года. Основная техническая задача — всевозможное уменьшение деформации при движении и наклонах зеркала — была успешно решена. Испытания, проведенные после завершения строительства радиотелескопа, показали, что планируемая точность поверхности зеркала в 1 мм достигнута, принцип гомологичности конструкции стал общепризнанным.

а)



б)



Рис. 7.8. Радиотелескоп института Макса Планка

Советские радиотелескопы

Строительство крупных полноповоротных радиотелескопов интенсивно развивалось и в СССР, и здесь огромную роль сыграла космическая гонка, породившая уже в начале шестидесятых годов XX века комплекс "Плутон" Центра дальней космической связи (Евпатория).

Комплекс «Плутон» состоит из трёх отдельных приёмных и передающих антенн АДУ-1000. Передающая (К-1) находится на 2-й площадке ЦДКС возле посёлка Заозёрное, две приёмные (К2 и К3) находятся на 1-й площадке ЦДКС. Разнесение антенн на 8,5 км связано с необходимостью изолировать чувствительное приемное оборудование на 1-й площадке от мощного излучения передающих антенн на 2-й площадке.

Для обеспечения устойчивой связи с космическими аппаратами внутри Солнечной системы необходимо было построить параболическую антенну диаметром около 100 метров. Сооружение такого типа антенн занимает 5-7 лет. Первые же пуски советских космических аппаратов к Марсу планировались на октябрь 1960 года. Главный конструктор СКБ-567 Евгений Губенко принял оригинальное предложение инженера Ефрема Коренберга построить вместо одной большой параболической антенны систему из восьми стандартных 16-метровых параболоидов (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Одна из двух приёмных антенн АДУ-1000

Антенна АДУ-1000 представляет собой решётку из восьми 16-метровых дюралевых параболических зеркал, расположенных в два ряда по четыре зеркала на общем поворотном устройстве.

Решётка размещена на двух прочных корпусах итальянских подводных лодок 1931 года выпуска, сваренных между собой и закреплённых на ферме железнодорожного моста, которая установлена на опорно-поворотном устройстве 305-миллиметровых орудийных башен главного калибра утилизируемых крейсеров типа «Сталинград». Все вращающиеся части каждой антенны весят 1500 тонн.

Комплекс «Плутон» обеспечивал все программы исследования дальнего космоса до конца 1970-х годов, когда его заменили новые,

более совершенные радиотелескопы. Особо отметим два таких инструмента (рис. 7.10).

Радиотелескоп П-2500 (РТ 70) — уникальный советский радиотелескоп, один из крупнейших в мире, находится в Центре дальней космической связи под Евпаторией. Антенное устройство рассчитано на работу в диапазоне длин волн до 8 мм. Антенна двухзеркальная - по системе Грегори. Диаметр основного зеркала - 70 м, диаметр вспомогательного зеркала - 7 м, высота антенны — 86,36 метра.

Строительство первого радиотелескопа этой серии закончено в 1978 году. Кроме выполнения обычных радиоастрономических задач, связанных с пассивным наблюдением собственного излучения небесных тел, комплекс включает в себя мощные передатчики, которые позволяют проводить активные космические эксперименты, связанные с излучением в сторону исследуемых объектов мощных электромагнитных потоков с последующим анализом принятых сигналов — в мире есть еще только один такой мощный радар — в Голдстоуне, Калифорния.

а)



б)



Рис. 7.10. Советские радиотелескопы:
а – РТ-70 под Евпаторией, б – РТ-64 в Медвежьих озерах

Полноповоротный прецизионный радиотелескоп РТ-64 с рефлектором диаметром 64 м для радиоастрономии и космической связи (Медвежье озеро, Московская область) запроектирован в ЦНИИпроектстальконструкции им. Н.П. Мельникова (Поляк В.С.).

РТ-64 стал первой отечественной реализацией новых идей формирования зеркальных систем большого размера, а именно ис-

пользования фокусной и угловой компенсации при подвеске контр-рефлектора через устройства, которые обеспечивают его выведение в позицию, соответствующую поверхности-гомологу.

При массе рефлектора 750 т в диапазоне углов места от 0° до 90° и скорости ветра до 15 м/с максимальные искажения (с учетом начальных неправильностей) не превышают 0,6... 0,8 мм.

В 1960-х годах, когда началось освоение космического пространства, военным понадобилась также система для слежения за запускаемыми спутниками, причем как за своими, так и за вражескими. В СССР такая система называлась "Звезда". Состояла она из множества огромных параболических антенн, с помощью которых советская разведка перехватывала информацию, передававшуюся через космос.

Этот серийный радиотелескоп, запроектированный также В.С. Поляком, назывался РТ-32 и имел зеркало диаметром 32 метра, которое обеспечивало точность 1,3 мм. Вес подвижной части равен 600 тоннам, диаметр самой большой шестерни в поворотном механизме - около 5 метров.

Кстати, насчет упомянутых здесь шестеренок. Рассказывают, что когда российские войска ушли из Латвии, где был установлен один из таких радиотелескопов (рис. 7.11), на следующий же день сюда приехали сотрудники ЦРУ, которые стали исследовать, какие из зубьев шестеренок поворотного механизма изношены сильнее, что, соответственно, могло указать, в какую часть неба и на какие спутники чаще всего была направлена антенна.



Рис. 7.11. Радиотелескоп РТ-32

Радиотелескоп Грин-Бэнк

Радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории США расположен в Грин-Бэнк, Западная Виргиния, США.

Это крупнейший в мире полноповоротный параболический радиотелескоп.

Зеркало имеет размеры по осям 100×110 м и представляет собой эллиптическую высечку из параболоида вращения (рис. 7.12).

Оно набрано из 2004 алюминиевых панелей, точность их изготовления и установки на каркас должна быть такова, что среднеквадратичное отклонение от теоретической поверхности не должно превышать 1 мм. Это требование достигается во время юстировки, когда используются регулировочные винты в узлах опирания панелей (см. рис. 7.13).

Для юстировки в трех ортогональных указаниях приводы головок установлены на "табурете", который расположен на плоской пластине. Табурет используется при вертикальном регулировании, а плоская пластина разрешает регулирование в горизонтальной плоскости. После юстировки параболоида вертикальное регулирование зажимается, и горизонтальное регулирование заваривается. В этих узлах предусмотрены актуаторы — автоматически управляемые силозадающие устройства.

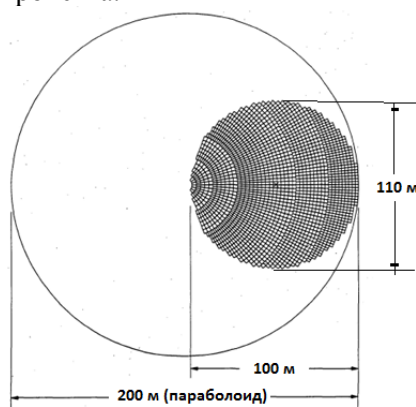


Рис. 7.12. Схема поверхности

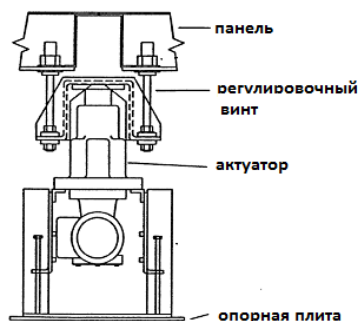


Рис. 7.13. Узел регулирования

Гомологичность системы парирует только искажения от силы тяжести, но остается еще один серьезный источник искажений отражателя, и он связан с тепловыми искажениями. Тепловые искажения не могут быть точно смоделированы, и, следовательно, требуется процедура автоматического регулирования с обратной связью. С этой целью используется лазерная система, позволяющая измерять расстояния с точностью до 0.1 мм на удалении до 200 метров.



Рис. 7.14. Радиотелескоп Грин-Бенк

Этот радиотелескоп может быть направлен в любую точку на небе с точностью, превосходящей одну тысячную градуса. Его огромный 100-метровый диаметр, открытая апертура и превосходная точность поверхности (измерения показали отклонения не более 250 микрон) обеспечивают беспрецедентную чувствительность телескопа в диапазоне радиоволн от 3,0 м до 2,6 мм.

Радиотелескоп весит приблизительно 7600 тонн, его строительство продолжалось около 10 лет, и он вступил в строй в августе 2000 года. Радиотелескоп назван в честь одного из родоначальников радиоастрономии Роберта С. Бёрда,

Неподвижные антенные системы

Диапазонный крестообразный радиотелескоп ДКР-1000 ФИАН

История этого крупнейшего радиотелескопа метровых волн достаточно трудная. Он был задуман В.В. Виткевичем как инструмент для глубокого подсчета источников для решения космологических задач, таких как эволюция Вселенной. К началу проектирования крестообразного радиотелескопа ФИАН в 1955г. сложилось представление, что для наблюдений дискретных радиоисточников более всего подходят радиотелескопы с незаполненной апертурой, для которых чувствительность и разрешающая способность могут быть подобраны в оптимальном соотношении.

Начало проектирования крестообразного радиотелескопа относят к 1955 г., когда в лаборатории колебаний ФИАН группа конструкторов

ров во главе с П.Д. Калачевым по инициативе В.В. Виткевича приступила к разработке механических конструкций большого радиотелескопа метровых волн пассажного типа с рефлектором в виде параболического цилиндра длиной в 1000 м и шириной 40 м (схема Миллса).

Удивляет смелость для 1955 г. взяться построить антенную систему длиной в 1 км с поворотом по углу места рефлектора шириной 40 м. И сейчас на посетителей ПРАО ФИАН производит впечатление такой размер радиотелескопа ДКР-1000 (рис. 7.15). "Изобретатель" схемы креста - проф.Б. Миллс, побывавший в обсерватории ФИАН в конце 60-х годов, был поражен русскими масштабами, увидев инструмент своими глазами.

Продемонстрировавшие свою надежность и долговечность металлические конструкции этого гигантского сооружения разработаны Киевской проектной конторой Проектстальконструкция (Л.О. Кагановский, П.М. Сосис).

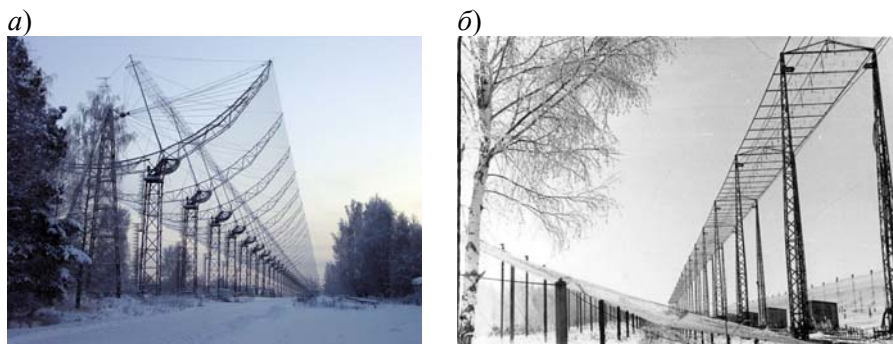


Рис. 7.15. Радиотелескоп ДКР-1000 ФИАН:
а - антенна Восток – Запад, б – антенна Север-Юг

Радиотелескоп Аресибо

Механические проблемы, присущие огромным подвижным параболоидам привели к развитию узкоспециализированных инструментов с полной апертурой. Например, радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико) состоит из вертикально направленного сферического зеркала диаметром 300 м, построенного в естественном чашеобразном углублении в земле (рис. 7.16.а).

В настоящее время это крупнейший в мире однозеркальный радиотелескоп. Основные параметры радиотелескопа: рабочий диапазон длин волн: от 3 см до 1 м; форма зеркала рефлектора: сфериче-

ская поверхность; диаметр зеркала рефлектора: 304,8 м; глубина зеркала рефлектора: 50,9 м.

а)



б)



Рис. 7.16. Радиотелескоп в Аресибо: а – общий вид; б - облучатель

Рефлектор телескопа расположен в естественной карстовой воронке и покрыт 38778 перфорированными алюминиевыми пластинами (размером примерно 1×2 м), уложенными на сетку из стальных тросов. Облучатель антенны (рис. 7.16.б) подвижный, он подвешен к трём башням на 18 тросах, с помощью которых реализуется перемещение облучателя, что определяет направление работы антенны. Башни расположены на окружности с диаметром 428 м, две из них имеют высоту 80 м, одна – 120 м.

Строительство радиотелескопа было начато в 1960 году. Первоначальным назначением телескопа были исследования ионосферы Земли. Автор идеи строительства: профессор Корнельского университета Уильям Гордон. Официальное открытие обсерватории Аресибо состоялось 1 ноября 1963 года.

Радиотелескоп Нанси

Другой тип инструмента (предложен Крауссом) состоит из неподвижного вертикально расположенного сферического зеркала, на которое направлено излучение источника с помощью плоского зеркала, установленного под определенным углом (на одном меридиане с первым). Большой инструмент такого типа работает во Франции).

Радиотелескоп (официальное сокращение NRT) расположен в маленькой коммуне Нансау в двух часах езды к югу от Парижа. Радиотелескоп впервые увидел свет в 1965 г. Это - один из крупнейших радиотелескопов в мире.

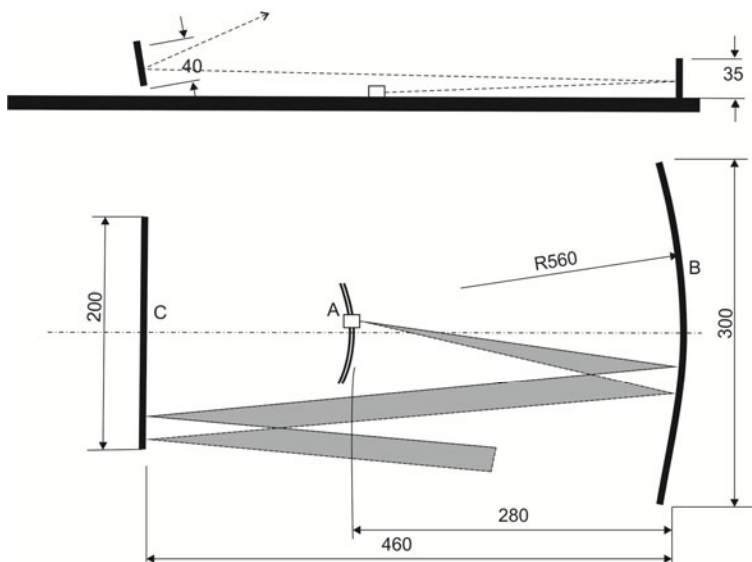


Рис. 7.17. Ход лучей в радиотелескопе системы Краусса

Создатель NRT Жан Роре (Jean Roret) запроектировал инструмент необычного типа с двумя зеркалами. Наклонная конструкция первичного зеркала состоит из десяти панелей, каждый 20 м длиной и 40 м высотой; она отражает радиоволны к неподвижному вторичному зеркалу, расположенному на расстоянии в 460 м (рис. 7.17). Вторичное зеркало имеет форму секция сферы с радиусом 560 м и сосредотачивает радиоволны к передвигному центральному блоку, который содержит антенны и другое приемное оборудование.

Оба зеркала покрыты металлической сеткой с квадратными отверстиями 12,5 мм на стороне, и их поверхности имеют точность порядка 5 мм. Первичное зеркало наклонено в направлении Север-Юг, чтобы наблюдать любые объекты вдоль меридиана, в то время как центральный блок перемещается по рельсам в направлении Восток-Запад, следуя за движением небесных объектов.

NRT способен к наблюдению объектов с наклоном к горизонту большим, чем 39° . Объекты около экватора могут быть прослежены приблизительно только в течение часа, но объекты близкие к зениту прослеживаются гораздо дольше. Наблюдения типично предпринимаются в частотах 1400 МГц (эквивалентно длине волны 21 см), 1660 МГц (18 см) и 3330 МГц (9 см).



Рис. 7.18. Радиотелескоп Нанси

Центральная пятая часть NRT была построена в 1961 году для доказательства работоспособности системы, остальное было закончено в 1964 и официально открылось в 1965 году. Научные наблюдения начались в 1967 г.

Механические конструкции космических антенн.

Большинство разработанных и проектируемых космических антенн относятся зеркальному типу. Они достаточно универсальны, и их конструкция в техническом отношении более подходит для космических условий.

Процесс доставки на орбиту требует использовать складывающуюся конструкцию, которую можно компактно уложить в транспортируемый контейнер. Далее можно рассматривать два типа конструктивных решений: автоматически раскрывающиеся конструкции и конструкции, монтируемые из отдельных частей с участием космонавтов.

Почти все уже использовавшиеся в космосе автоматически раскрывающиеся зеркальные антенны были зонтичного типа. Их зеркальную часть составляют радиально расположенные ребра жесткости, к которым прикреплена отражающая поверхность, изготавливаемая

из растягиваемых металлизированных пленок, тканей или сеток. По-видимому, зонтичная конструкция является оптимальной для небольших бортовых антенн, работающих на достаточно длинных волнах. Последнее связано с тем, что отклонения реальной отражающей поверхности от теоретической здесь велики.

Наибольшая по размеру и наиболее интересная по конструктивному решению антенна зонтичного типа была установлена на американском спутнике «АТС-6». Зеркало этой антенны в сложенном виде имело диаметр 2,5 м, в развернутом – 9,1 м. Оно было жестким в своей центральной части (размером 2,2 м), к которой были присоединены 48 гибких ребер, растягивающих отражающую поверхность из металлизированного дакрона (рис. 7.19).

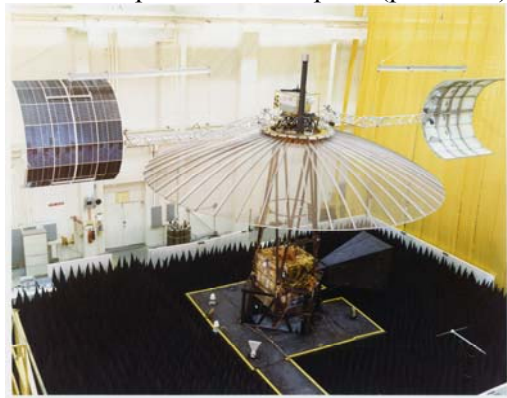


Рис. 7.19. Антенна АТС-6 на испытательном стенде

АТС-6 один из наиболее удачных спутников связи, он был запущен с мыса Канаверал 30 мая 1974 г. Конструктивное решение его антенной системы повторялось неоднократно и используется до настоящего времени.

Оно было использовано на запущенном 18 июля 2011 года в космос радиотелескопе «Радиоастрон», с антенной диаметром 10 м (рис. 7.20), который находится на борту спутника «Спектр-Р». Разработчиком комплекса научной аппаратуры является Астрокосмический центр ФИАН.

Телескоп предполагает изучение активных галактических ядер и сверхмассивных черных дыр, исследование темной материи и энергии и многое другое.

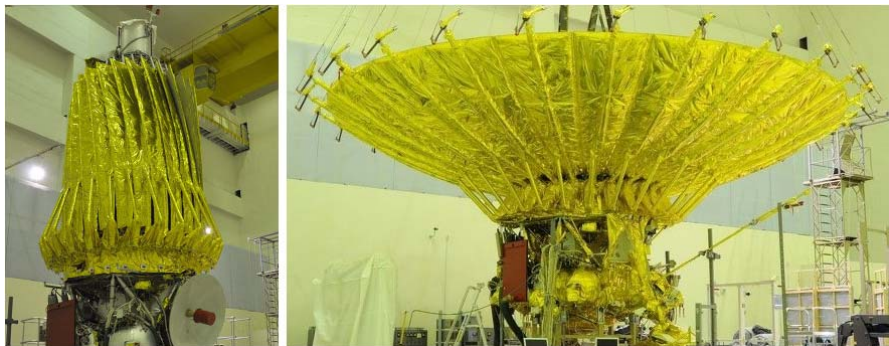


Рис. 7.20. «Радиоастрон» в транспортном и развернутом положении

К недостаткам космических антенн зонтичного типа относят сравнительно низкую жесткость зеркала и большие отклонения реальной поверхности от теоретической. В этих антеннах натянутый между ребрами материал располагается по цилиндрической поверхности, и отклонения от теоретически заданной формы зеркала растут с увеличением расстояния между ребрами.

Характерные для антенн зонтичного типа недостатки могут быть в существенной мере устранены в конструкциях типа пространственно стержневых ферм. Такие системы могут иметь очень большие размеры, и для проверки их работоспособности в свое время был запущен космический радиотелескоп КРТ-10, сконструированный в ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова (А.Г. Соколов, А.С. Гвамичава)

Он был двухсетчатой конструкцией – структурные фермы, состоящие из двух ячеистых куполов, соединенных между собой жесткими диагональными стержнями одинаковой длины. Сами же купола составлены из гибких тросиков (рис. 7.21).

Раскрытие каркаса и натяжение гибких нитей происходило за счет пружин, установленных в узлах верхней и нижней сеток. В состав механизма раскрытия входят жестко закрепленная в узле каркаса направляющая, а также перемещающаяся вдоль нее под действием пружины втулка и три вспомогательных стержня, шарнирно соединенных с втулкой и диагональными стержнями.

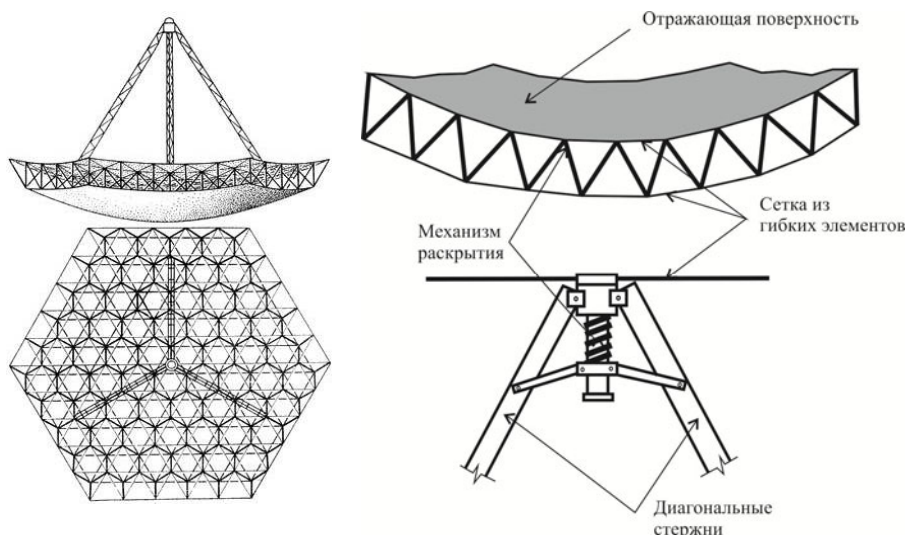


Рис. 7.21. Схема конструкции антенны КРТ-10

Главное зеркало КРТ-10 представляло собой шестиугольную высечку из параболоида вращения. Каркас зеркала состоял из диагональных стержней (из алюминиевых сплавов) сечением 6×12 мм и тросиков диаметром 1 мм. Узлы были выполнены из алюминиевых сплавов, а пружины – из высокопрочных сталей. В качестве отражающей поверхности использовалось специально разработанное трикотажное сетчатое полотно из металлических провололочек диаметром 50 мкм. Масса зеркала составляла 65 кг, и в сложенном виде оно представляло собой шестиугольную призму с максимальным размером у основания 0,5 м и общей длиной 0,9 м.

Многие идеи конструкции КРТ-10 были позже использованы в других космических отражателях. В качестве примера можно указать на японский спутник ETS-VIII, который под условным названием Kiku-8 (в переводе с японского означает "хризантема") запущен на околоземную орбиту 18 декабря 2006 года. Это один из самых больших спутников связи, он предназначен для отработки применения на практике новых технологий.

Аппарат ETS-VIII разработан в Агентстве Исследования Космоса Японии создан и снабжен самой большой в мире геостационарной спутниковой антенной. Цель этого эксперимента состоит в том, чтобы провести орбитальные испытания конструкций крупномасштабного складного отражателя LDR.

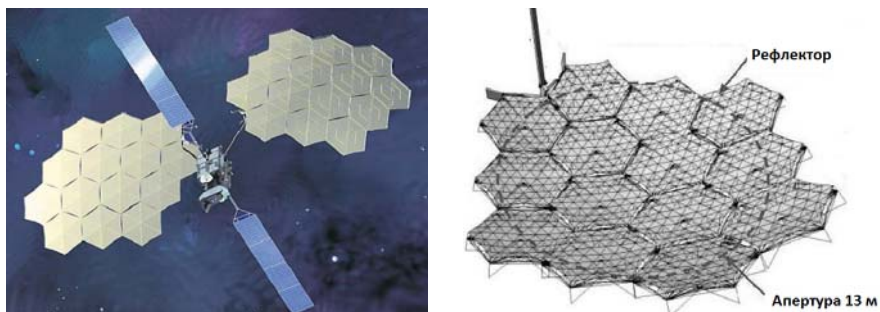


Рис. 7.22. Отражатель LDR

Отражатель LDR имеет модульную конструкцию обеспечивающую точность поверхности со среднеквадратичными отклонениями не более 2,4 мм. Каждый из двух LDR состоит из 14 модулей шестиугольной формы (рис. 7.22). После того, как развернутый, каждый отражатель формирует поверхность параболы с размерами 19 x 17 м. Во время запуска система LDR упакована в цилиндрическом контейнере диаметром 1 м. и длиной 4 м.

Очерк восьмой. КОНСТРУКЦИИ ЕМКостей

Необходимость хранения жидкостей и сыпучих материалов (позже и газов) заставила уже очень давно начать создание соответствующих конструкций. По-видимому, к первым здесь следует отнести деревянные бочки, изготовление которых известно еще с древности, причем многие из них имели весьма внушительные размеры. В XVI–XVIII веках в Европе начался настоящий взрыв по изготовлению огромных винных бочек, которые могли вмещать в себя сотни тысяч литров вина. Такую бочку, например, соорудили для германского архиепископа в 1500 году, примерно в это же время была изготовлена еще одна гигантская бочка на 455 тысяч литров в городе Гейдельберге.

Однако начало систематического применения стальных емкостей последовало уже в XIX веке вслед за массовым строительством городских водопроводов. Сказалось здесь и железнодорожное строительство, когда на многих станциях появились водонапорные башни с емкостями достаточно большого размера. И практически вслед за этим началось бурное развитие емкостных сооружений, вызванное созданием и интенсивным ростом нефтегазовой промышленности.

Баки для воды

С начала технического века, производства железа, изобретения парового двигателя и паровоза были созданы необходимые технические предпосылки для совершенствования водоснабжения. Примерно с середины XIX века и до первого десятилетия века XX наблюдалось интенсивное развитие конструкций стальных напорных баков для воды, которые прошли следующий путь развития.

В Германии, начиная с 1835 года (в Англии с 1830-го), на железнодорожных станциях в качестве резервуара для воды использовались прямоугольные ящики из чугуна. Они устанавливались непосредственно в вокзальных зданиях, и прямоугольная форма здесь оказывалась уместной. Конструкция набиралась из нескольких пло-

ских дисков (боковые стенки и днище), по краям которых находились фланцы. Бак связывался болтами через эти фланцы и уплотнялся.

Фланцевые стыки не могли выдержать большое гидростатическое давление, да и конструкция уплотнения была ненадежной. Кроме того, прогибающееся под весом воды днище требовало установки достаточно густого ростверка из деревянных брусьев.

Части недостатков описанного решения была лишена конструкция цилиндрического бака с плоским днищем (по сути — металлическая бочка), которую также начали использовать, устанавливая в верхних этажах железнодорожных зданий. Но и здесь, как в прямоугольных баках, слабым местом было плоское днище — плоские листы работают невыгодно, испытывая большие напряжения, и поэтому требуют особых подпор; недостатком являлась также и недоступность днища для осмотра и ремонта и т. д. Поэтому такие конструкции были быстро вытеснены резервуарами с коническими и сферическими днищами, которые давали возможность придать им меньшую толщину, и обеспечивали доступность всего днища для осмотра и ремонта.

Опорная часть этих резервуаров представляет собой кольцо, являющееся продолжением боковых стенок резервуара и укрепленное внизу накладками и угольниками (рис. 8.1).

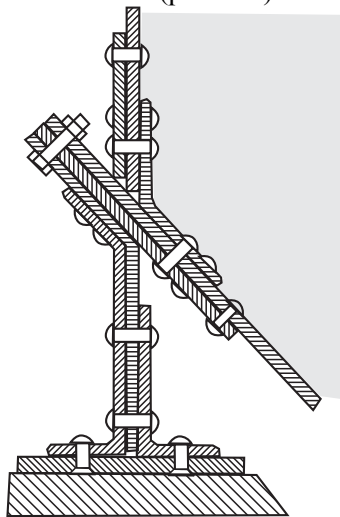


Рис. 8.1. Опорное кольцо первых клепаных резервуаров для воды

Первые резервуары такого типа появились в конце 1860-х годов при строительстве французской железной дороги (рис. 8.2). Они были разработаны по инициативе Жюль Дюпюи (Jules Dupuit, 1804–1866), которому принадлежит соответствующая публикация 1855 года.

По-новому решил проблему сопряжения опорного кольца с корпусом резервуара немецкий инженер Отто Интце (Otto Intze, 1843-1904), который предложил использовать сфероконическое днище бака (рис. 8.3). Этим достигалось заметное уменьшение размера опорного кольца, что приводило к облегчению поддерживающей башни, и, кроме того, при некоторых соотношениях размеров удается получить решение, в котором на опорное кольцо передаются только вертикальные нагрузки.

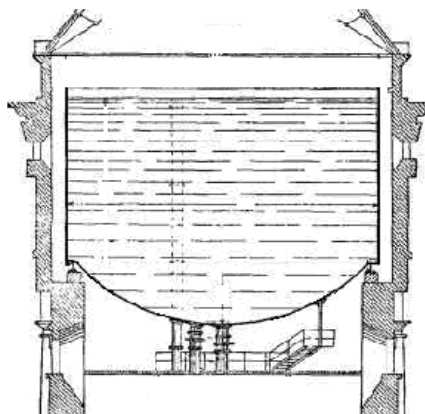


Рис. 8.2. Резервуар со сферическим днищем

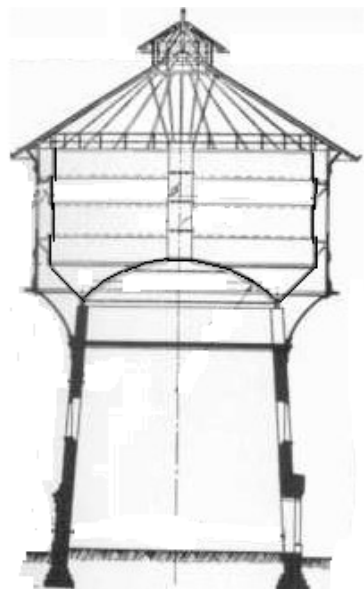


Рис. 8.3. Водонапорный бак с днищем Интце

Баки Баркгаузена (Karl Georg Barkhausen, 1849–1923) отличаются сочетанием цилиндрической боковой стенки с полушаровым днищем при обеспечении плавного сопряжения цилиндра с экватором сферы. В месте сопряжения реализовывалось и опирание бака (рис. 8.4).

Первые возведенные по принципу Баркгаузена баки были построены по лицензии автора фирмой инженера Августа Кленне (August Albert Alexander Klönne, 1849–1908). Позже Август Кленне сконструировал шарообразный бак с опиранием на расположенный в нижней полусфере усиленный пояс (рис. 8.5,а).

нусообразному переходу от сферы к опоре, когда конус примыкал к сфере по касательной, уменьшая местный изгиб. Второй патент заявлял возможность изменения направления выпуклости сферы (рис. 8.5,б), напоминая в этом смысле решение Интце. Первая водонапорная башня конструкции Кленне сооружалась в 1906 г. на территории депо станции Хемниц (Германия) и имела объем 400 м^3 . Хемницкие контейнеры имели диаметр 9,5 м при максимальном уровне воды 7,75 м.

В дальнейшем изменения конструкции водонапорных баков почти не происходили, и постепенно само их массовое строительство замерло. Однако, начиная с 50-х годов XX столетия, когда началось интенсивное освоение и заселение маловодных районов, интерес к таким конструкциям возродился снова.

Началось строительство больших водонапорных башен, причем к ним, помимо утилитарных, предъявлялись и эстетические требования, поскольку эти сооружения часто располагались в быстрорастущих пригородах крупных населенных пунктов, где требовалось модернизировать службу водоснабжения, чтобы соответствовать притоку новых жителей и фирм. Типичным примером могут служить три водонапорные башни с баками сфероидальной формы, построенные в г.Манор (штат Техас, США) и показанные на рис. 8.6. Левый резервуар является чисто сферическим, (конус внизу сферы — это переходная часть опоры), два других резервуара сфероидальные.



Рис. 8.6. Водонапорные башни в Техасе

Получили также распространение водонапорные башни с баками, форма которых определяется сферическими и цилиндрическими поверхностями, у которых места сопряжения сглажены тороидальными вставками (рис. 8.7).



Рис. 8.7. Современные водонапорные башни

Силосы для хранения зерна

Проблема сохранения урожая и создание запасов зерна является одной из древнейших. Древние греки для этого использовали большие глиняные сосуды, которые помещали в подвалы или подземные галереи. На более позднем этапе для удовлетворения местных потребностей строились надземные хранилища (кукурузные сапетки).

В средние века с развитием системы сельского хозяйства зерно хранили на глинобитном току или в зерновых складах. Напольное хранение использовали в последующие 150 лет, оно явилось предвестником современных методов хранения. Однако по мере совершенствования транспортных средств местные запасы перемещались в региональные, более экономичные хранилища.

История строительства стальных силосов для хранения зерна восходит к началу 30-х годов прошлого столетия. На начальном этапе для постройки силоса использовались 6-14 мм стальные панели, сваренные между собой. Благодаря толстым стенкам, такая конструкция имела хорошую герметизацию, высокую прочность и длительный срок эксплуатации – 30-50 лет. Недостатками такого силоса являлись: использование большого количества стали, слишком высокая себестоимость строительства и невозможность расширения его площади.

В 1968 году немецкий ученый Ксавер Липп использовал специальное оборудование для обработки листового металла и применил его для возведения спирально-навивного силоса. В 1969 году в Германии был построен первый такой силос. И с конца 60х годов в Европе начали использовать силоса с тонкими стенами. Наиболее часто встречающимися были два вида силосов немецкой технологии: круглые стальные силосы с фальцевым зажимом, а так же болтового сборного типа из гофрированных стальных листов.



Рис. 8.8. Силосы для хранения зерна: *а* - оцинкованный стальной спирально-фальцевый силос; *б* - стальной силос болтовой сборки из листовой гофрированной стали

Данные силосы имеют легкий вес, простую сборку, низкую себестоимость, механизацию, высокую степень автоматизации, высокую эффективность и другие особенности. В течение десяти лет изучения и исследования на практике эта технология успешно зарекомендовала себя, и с начала 70х годов началось крупномасштабное производство оцинкованных стальных силосов.

Спустя десятилетия постепенного ознакомления, изучения и практических исследований в области конструирования данных силосов, особенно начиная с 70-х годов, с применения стандартных материалов, строительство тонкостенных силосов получило крупномасштабное развитие.

Резервуары для нефти и нефтепродуктов

Резервуары предназначены для приемки, хранения и отпуска жидкостей, среди которых первыми по значению являются нефть и нефтепродукты. Во время их хранения происходит испарение и потеря наиболее ценных летучих фракций вещества, эти потери происходят,

главным образом, во время так называемых малых и больших «дыханий» резервуара.

Малые дыхания связаны с колебаниями температуры нефтепродуктов и колебаниями атмосферного давления, большие дыхания происходят во время наполнения и опорожнения резервуара.

С потерями нефтепродуктов борются за счет увеличения давления в газовой «подушке» (смеси паров нефтепродукта и воздуха, расположенной над поверхностью жидкости), или же путем ликвидации самой газовой подушки, отделив воздушное пространство от поверхности жидкости. От этого зависит конструкция резервуара.

Вертикальные цилиндрические резервуары низкого давления

Для хранения нефти и нефтепродуктов с низкой упругостью паров применяются обычно вертикальные цилиндрические резервуары постоянного объема со стационарной крышей (рис. 8.9). Они просты в изготовлении и монтаже и достаточно экономичны по расходу металла. Объем их колеблется в широких пределах — от 100 до 50000 м³. Резервуары этого типа выполняются, как правило, наземными, они устанавливаются на специально подготовленной песчаной подушке, покрытой гидрофобным слоем.

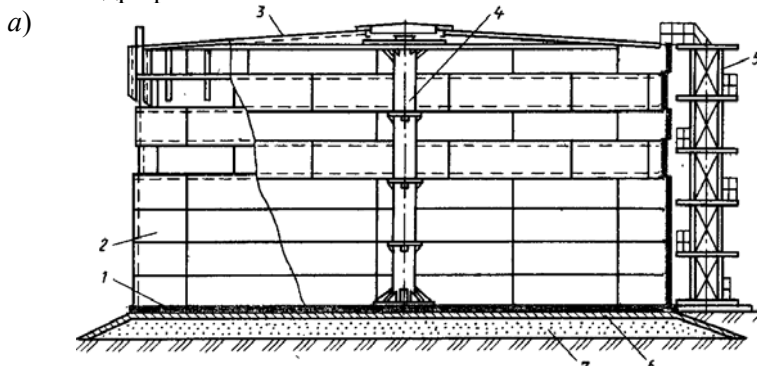


Рис. 8.9. Стальной цилиндрический резервуар: 1 – днище, 2 – стенка, 3 – коническая крыша, 4 – центральная стойка, 5 – шахтная лестница, 6 – изоляция, 7 – песчаное основание

Исторически первыми были вертикальные цилиндрические резервуары, введенные в нефтяную отрасль по предложению В.Г. Шухова. Первое в мире цилиндрическое нефтехранилище из склепанных листов стали было построено В.Г. Шуховым на Балахнинских нефтепромыслах под Баку в 1878 году по заказу нефтяной компании братьев Нобель во время начала строительства первого российского нефте-

провода. До этого нефть хранилась на российских промыслах в прудах под открытым небом, а в США — в прямоугольных нефтехранилищах.

В 1883 году В. Г. Шухов опубликовал работу «Механические сооружения нефтяной промышленности», в которой приведены основные принципы расчета и строительства цилиндрических стальных резервуаров на песчаных подушках. В этой работе Шухов доказал, что оптимальной формой резервуара, исходя из экономии стали, является цилиндр, основание которого скреплено с круглым тонкостенным стальным плоским днищем, лежащим на «песчаной подушке», покрытый сверху конической или плоской крышей. Шухов стандартизировал основные типоразмеры резервуаров, благодаря чему в России по его чертежам только до 1917 года было построено более 20 тысяч резервуаров-нефтехранилищ.

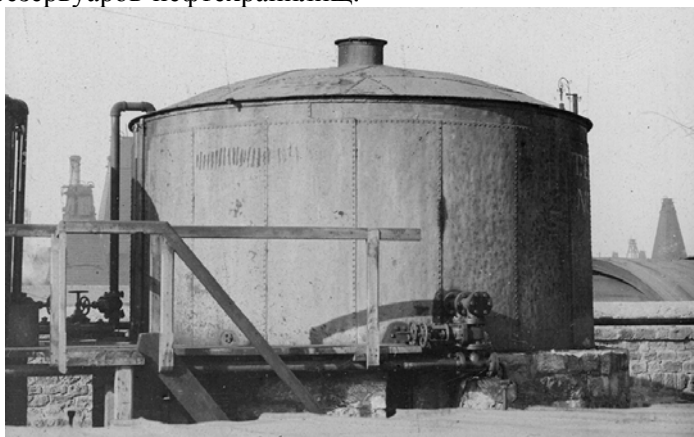


Рис. 8.10. Один из первых резервуаров Шухова

При переходе к хранению бензина довольно быстро обнаружилось, что простейшая конструкция резервуара приводит к заметным потерям легких нефтепродуктов, и было предложено использовать понтон, который представлял собой плавающий экран, обеспечивающий отделение хранимого в резервуаре продукта от его газового пространства (рис. 8.11).

Резервуар с металлическим понтоном впервые сооружён в 1927 г. (США), с неметаллическим понтоном — в 1955 г. (Франция). В СССР металлические понтоны стали применяться с 1958 г. (оборудуются резервуары вместимостью до 50 тысяч м^3), синтетические — с 1962 г. (до 5 тысяч м^3).

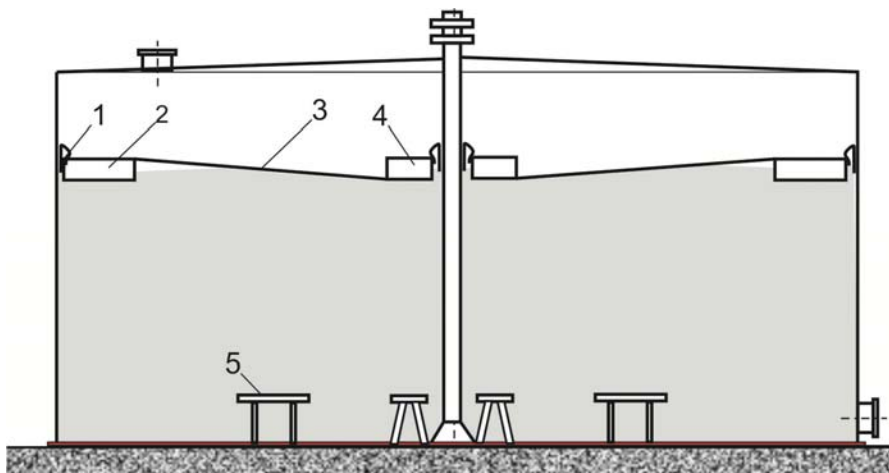


Рис. 8.11. Резервуар с плавающим металлическим понтоном: 1 – уплотняющий затвор; 2 – периферийный короб понтона; 3 – мембрана из листового металла; 4 – центральный короб понтона; 5 – опоры для понтона

Понтон состоит из понтонного кольца, обеспечивающего плавучесть всего понтона, и центральной части из плоских стальных листов толщиной 4 мм. Между стенкой резервуара и наружной стенкой понтона имеется зазор шириной 200–275 мм. Для герметизации этого пространства устанавливают уплотняющие затворы жесткого или мягкого типа. Понтонное кольцо в нижнем положении опирается на стойки, расположенные по концентрическим окружностям, число которых зависит от объема резервуара.

Наличие понтона во многих случаях дает возможность отказаться от стационарной крыши, что привело к появлению резервуаров с плавающей крышей. Первый резервуар с плавающей крышей для нефтедобывающей промышленности был сооружен фирмой СВ&I (США) в 1923 году.

Крыша сопрягается с корпусом резервуара с помощью специальных затворов различной конструкции для обеспечения герметизации пространства под крышей. Для придания открытой сверху стенке резервуара необходимой жесткости и устойчивости в пределах верхнего пояса устанавливают кольцо жесткости, которое одновременно является и ходовой площадкой.

Резервуары с открытой плавающей крышей можно применять лишь в южном и среднем климатических поясах. В северных районах, где возможны снежные заносы, открытые плавающие крыши непри-

менимы. В этих условиях эксплуатации применяют резервуары с понтоном и стационарной крышей.

Начиная с 1953 года, практически все крупные резервуары (объем 40000 м³ и более) в Японии, Нидерландах, Германии оборудуются плавающей крышей. В особенности это касается припортовых нефтехранилищ (рис. 8.12), где очень высока оборачиваемость продукта и велики потери от больших дыханий.



Рис. 8.12. Нефтехранилище в порту близ Роттердама

Наряду с уже ставшими традиционными резервуарами в последнее время получили распространение резервуары с двойным дном и с двойными стенками (рис. 8.13). Вторая стенка выполняет функции защиты окружающей среды от растекания нефтепродуктов по территории в случае разрушения первой (основной) стенки. Второе дно предохраняет почву от проникновения нефтепродуктов в случае протечек основного днища.

Монтаж цилиндрических резервуаров

Поначалу резервуары склепывались на месте строительства из плоских (днище) и свальцованных (стенка) стальных листов. Первый сварной резервуар появился в СССР в 1935 году. Применение сварки вместо клепки позволило существенно ускорить производство и сделать конечную стоимость готового сварного резервуара более дешевой. Данные обстоятельства полностью исключили процесс клепки из технологического цикла создания резервуаров.



Рис.8.13. Резервуар с двойными стенками

Летом 1948 года на нефтебазе в г. Киеве впервые был сооружен вертикальный цилиндрический резервуар $V=240 \text{ м}^3$, днище и стенка которого смонтированы из рулонных заготовок путем их принудительного разворачивания на монтажной площадке. Идея монтажа стенки и днища резервуаров из крупногабаритных рулонных заготовок, сваренных в заводских условиях из отдельных листов и свернутых в габаритные рулоны, предложена в ИЭС им. Е.О. Патона д. т. н. Раевским Г.В. в 1944 году и впервые была реализована под его руководством в 1948 году.

Метод рулонирования, так назвали предложенный способ монтажа резервуаров, вошел славной страницей в историю отечественного резервуаростроения для хранения нефти и нефтепродуктов. Метод постоянно расширял границы применения, и к 1952 году с его применением был смонтирован самый большой в то время резервуар с $V=4600 \text{ м}^3$.

В 1958 году Г.В. Раевский, Е.К. Алексеев, В.М. Дидковский, Е.А. Игнатенко, О.М. Иванцов, В.С. Корниенко, В.С. Ляхов и Б.В. Поповский (руководители работы) были удостоены Ленинской премии «За разработку и внедрение индустриального метода строительства нефтерезервуаров из плоских полотнищ, сворачиваемых в рулоны».

В 1961 году методом рулонирования был построен резервуар $V=10000 \text{ м}^3$, а в 1974 году начали монтаж из рулонных заготовок стенки резервуара $V=50 \text{ тыс. м}^3$ из высокопрочной стали 16Г2АФ (С60/45) толщиной 17 мм. Однако полистовая сборка не была полностью вытеснена методом рулонирования, поскольку последний имел

ограничение по толщине листов в рулоне, и для резервуаров большой емкости рулонирование не применялось.

В самое последнее время появились технологии монтажа резервуаров способом подращивания, когда самые ответственные работы по сварке листов реализуются в стационарных условиях на земле.

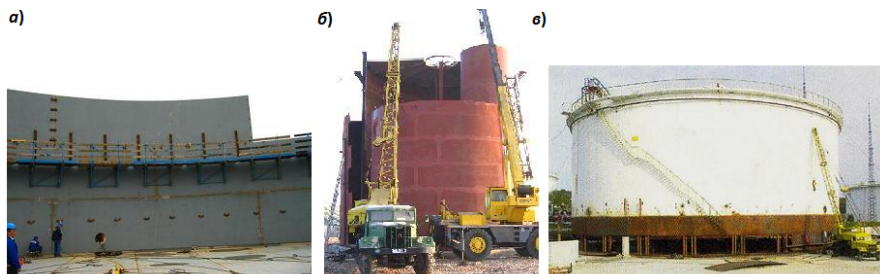


Рис. 8.14. Монтаж резервуаров: *а* – листовая сборка, *б* – разворачивание рулона, *в* – подращивание

Сферические резервуары

Сферические резервуары предназначены для хранения под избыточным внутренним давлением (до 250 кПа) легковоспламеняющихся жидкостей, сжиженных и сжатых газов и других продуктов. Они используются в нефтеперерабатывающей, химической и других отраслях промышленности.

Сферический резервуар представляет собой стальную сферическую оболочку, опирающуюся на стальные опоры. Если сферический резервуар предназначен для хранения продукта при постоянной отрицательной температуре (изотермические резервуары), то корпус с наружной стороны покрывают теплоизоляционными материалами. Первый сферический резервуар был построен в 1923 году фирмой Chicago Bridge & Iron Company (CB&I), которая дала ему торговую марку Hortonsphere по фамилии главы CB&I Гортон (Horace E. Horton), обладателя патента на эту конструкцию.



Рис. 8.15. Шаровые резервуары

Шаровые резервуары (рис. 8.15) имеют вместимость $400...1000 \text{ м}^3$ при давлении $0,2...0,6 \text{ МПа}$. Шаровой резервуар устанавливают на $4...12$ колоннах. Толщина шаровой оболочки $8...30 \text{ мм}$, их диаметр достигает сорока метров.

Каплевидные резервуары

Каплевидный резервуар имеет форму капли жидкости, лежащей на несмачиваемой поверхности (рис. 8.16). В этих резервуарах поддерживается повышенное давление (до 70 кПа), обеспечивающее сокращение потерь жидкости от испарения при "малых дыханиях" резервуара.

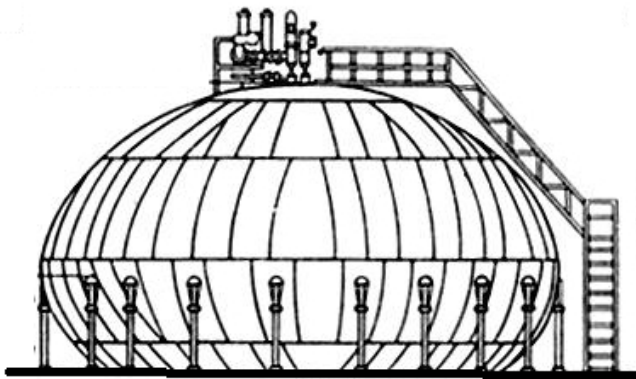


Рис. 8.16. Каплевидный резервуар

Различают цилиндрические и круговые конструкции каплевидных резервуаров. Резервуар сооружается на песчаном основании. Стальные листы оболочки (толщина оболочки постоянна) опираются на внутренний каркас, состоящий из нескольких криволинейных ферм,

соединённых в верхней части опорным кольцом. Каркас повышает устойчивость оболочки от действия наружного давления. Вместимость каплевидных резервуаров достигает 12000 м^3 .

Газгольдеры

Газгольдеры предназначаются для хранения газа и регулировки давления при его потреблении. Объем газохранилищ на газгольдерных станциях достигает нескольких сот тысяч кубометров, что составляет 50–75% суточного потребления газа. По своей конструкции газгольдеры делятся на две группы:

- газгольдеры переменного объема — мокрые и сухие, работающие при низком давлении, не превышающем 0,05 ати (избыточных атмосфер);
- газгольдеры постоянного объема, работающие при высоких давлениях газа — от 2 до 20 ати.

Мокрые газгольдеры

Газгольдеры переменного объема по своей конструкции разделяются на две группы: мокрые и сухие. Мокрые газгольдеры большей частью делают телескопическими. Верхняя часть такого газгольдера — колокол — может подниматься вверх под влиянием давления газа, увлекая за собой промежуточные кольцевые звенья — телескопы. Телескопов может быть несколько.

В нижней части мокрого газгольдера, резервуаре, налита вода. Газ подается снизу и наполняет весь газгольдер. Колокол и телескоп по мере подъема зачерпывают воду своими карманами-желобами, расположенными по краям, причем зачерпнутая в карман вода служит гидравлическим затвором, не пропускающим газ наружу.

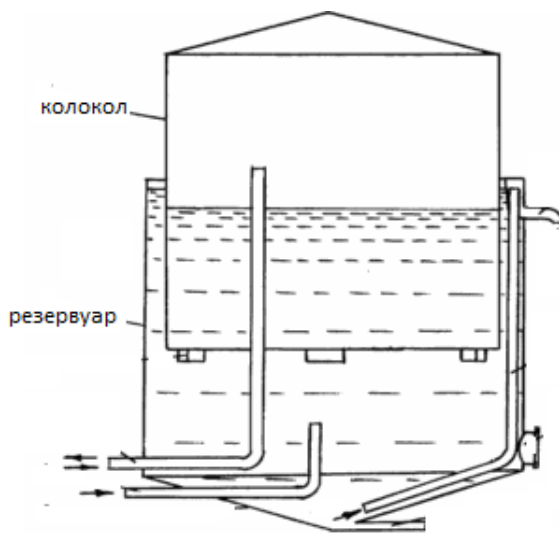


Рис. 8.17. Схема мокрого газгольдера

Для того, чтобы обеспечить плавное движение колокола и телескопа и избежать перекосов, вокруг газгольдера устанавливают направляющие двутавровые стойки, которые связывают крестами в жесткую пространственную конструкцию. По стойкам двигаются ролики, прикрепленные с помощью консолей к поднимающимся частям газгольдера.

Первый в мире мокрый газгольдер емкостью около 100 литров, предназначенный для хранения газа в лаборатории, придумал французский химик Антуан Лавуазье (Antoine Laurent de Lavoisier, 1743 — 1794) в 1781 году. Изначально этот газгольдер имел прямоугольную форму, но через несколько лет Лавуазье улучшил его, придав газгольдеру правильную цилиндрическую форму.

Первый мокрый газгольдер промышленного типа был построен английским химиком Вильямом Мордохом (William Murdoch, 1754-1839) в 1816 году. Он имел четко прямоугольные очертания. Для уравнивания отдельных элементов этого газгольдера были применены железные цепи с противовесами.

В 1820 г. английский химик С. Клегг (Samuel Clegg, 1781–1861) построил первый мокрый газгольдер для промышленных предприятий, имевший цилиндрическую форму.

В начале XIX века возникла и начала развиваться светильно-газовая промышленность. Для нужд уличного освещения строились

светильно-газовые заводы, и мокрые газгольдеры стали неотъемлемой их частью.

Таким образом, газовое освещение улиц появилось впервые в Лондоне приблизительно в 1913 г. В 1835 г. зажглись газовые фонари на улицах Петербурга, в 1864 г. — в Вильно, в 1865 г. — в Москве и в 1871 г. — в Харькове. Далее мокрые газгольдеры стали применяться не только в светильно-газовой, но и в химической промышленности, с учетом того, что емкость мокрых газгольдеров стала сильно расти. Уже в 1888 г. в Лондоне был сооружен газгольдер емкостью около $230\,000\text{ м}^3$, а в 1898 г. — емкостью в $345\,000\text{ м}^3$. Самый объемный мокрый газгольдер, вмещавший в себя $424\,800\text{ м}^3$, был построен в США.



Рис. 8.18. Общий вид мокрого газгольдера

В СССР максимальная емкость мокрого газгольдера была равна $100\,000\text{ м}^3$ (Днепропетровск). Газгольдер проектировался институтом Гипроспецпромстрой, построен — в 1933 г.

Мокрый винтовой газгольдер

В конце XIX века английскими механиками Гэддом и Мейзоном была предложена конструкция «геликоидального» мокрого газгольдера с винтовыми направляющими.

Первоначально винтовые газгольдеры производили только в Великобритании, а затем они нашли применение и в Европе, и сейчас их строят во всем мире.

Самая максимальная емкость действующего винтового мокрого газгольдера равна $225\,000\text{ м}^3$.

Сейчас за рубежом развивается строительство винтовых мокрых газгольдеров с небольшой заменой стальных конструкций резервуара предварительно напряженным бетоном.



Рис. 8.19. Винтовой газгольдер емкостью $165\,000\text{ м}^3$

Сухой поршневой газгольдер

Сухой газгольдер представляет собой неподвижный корпус с днищем и крышей, внутри которого перемещается поршень-шайба. Сухие газгольдеры делают кубатурой от $10\,000$ до $100\,000\text{ м}^3$. При наполнении газгольдера снизу газ после достижения им определенного давления преодолевает вес поршня и поднимает его; при расходе газа поршень опускается и своим весом вытесняет газ.

Придуманый в Германии около 1903 г. сухой поршневой газгольдер впервые был построен в 1915 г. и имел емкость $1\,700\text{ м}^3$.

Самые первые сухие газгольдеры строились немецкой фирмой МАН, а уже позже появилась успешно конкурирующая с ней похожая немецкая фирма «Клённе», которая строила сухие поршневые газгольдеры лучшего типа. После первой мировой войны сухие газгольдеры поршневого типа получили большое распространение, потому что на первый взгляд казалось, что сухие газгольдеры обладают некоторыми преимуществами перед мокрыми. Так же считалось, что сухие газгольдеры большой емкости наиболее экономичны по затратам стали, и около г. Обергаузен (Германия) был построен сухой газгольдер емкостью $347\,000\text{ м}^3$, а в Чикаго (США) — емкостью $566\,000\text{ м}^3$. В США возводилась постройка сухого газгольдера емкостью $1000\,000\text{ м}^3$.

В России сухие газгольдеры поршневого типа своей конструкции строились емкостью до 50000 м^3 . Эти газгольдеры «имели более передовое конструктивное решение, улучшенную систему уплотнения между корпусом и поршнем», чем газгольдеры немецких фирм.

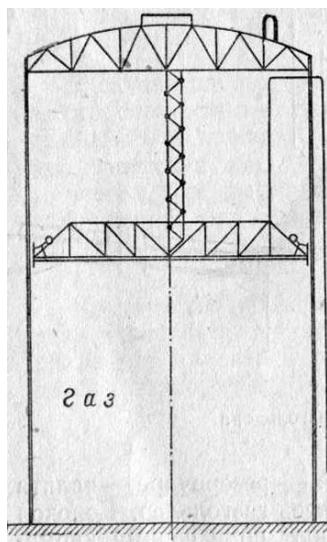


Рис. 8.20. Сухой газгольдер: схема и общий вид

Множество тяжелых аварий, стоимость эксплуатации и выявившаяся не совсем достаточная надежность в эксплуатации остановили победный путь сухих газгольдеров поршневого типа. Но промышленность предъявляла спрос на сухие газгольдеры. Необходимо было искать другие конструктивные решения сухих газгольдеров, которые должны были основываться на совершенно новых принципах.

После второй мировой войны в разных странах стали появляться новые типы сухих газгольдеров.

Сухой газгольдер с гибкой секцией

Новый сухой газгольдер имел подвижную шайбу и соединительную гибкую секцию. Первое промышленное строительство сухих газгольдеров нового типа, названных по имени изобретателя газгольдера Уиджинса, производилось немецкими фирмами. Емкость газгольдеров этого типа, сделанных в Европе, не превышает 5000 м^3 .

В России сухие газгольдеры с гибкой секцией строятся емкостью от 100 м^3 до $10\,000 \text{ м}^3$.

Газгольдеры высокого давления

В 1912 г. в Германии появились принципиально новые газгольдеры постоянного геометрического объема и высокого переменного давления. Они представляли собой стальные цилиндрические или сферические емкости, в которые под высоким давлением нагнетался

газ (рис. 8.21). Хотя геометрический объем газгольдера оставался постоянным, объем хранимого газа мог многократно увеличиваться, причем фактический объем хранимого газа кратен давлению газа в атмосферах.



Рис. 8.21. Цилиндрический и сферические газгольдеры высокого давления

Так, в газгольдер емкостью 100 м^3 при давлении газа в 10 атмосфер может поместиться 1000 м^3 газа. Этот газгольдер имеет изменяющееся давление газа; по мере нагнетания газа давление в газгольдере увеличивается до расчетного, а при выпуске газа давление падает.

Уже в годы первой мировой войны в г. Феникс США был построен первый шаровой газгольдер емкостью 2850 м^3 для хранения газа под давлением 3,5 атм.

В последующие годы шаровые газгольдеры строились в различных странах на разные величины давления газа. Стальной шаровой газгольдер максимального объема в $87\,000 \text{ м}^3$ был построен для ядерного реактора в Шиноне (Франция) в 1963 г. и имеет диаметр 55 м. Он рассчитан на давление 17 атмосфер и эксплуатационную температуру 235°C .

В России такие газгольдеры строятся емкостью от 300 до 2000 м^3 и используются в основном для хранения сжиженных газов.

В промышленности используются обезвоженные газы и газы очень высокой концентрации. Для их хранения не подходят мокрые газгольдеры и сухие газгольдеры поршневого типа, так как хранимые газы могут увлажниться или загрязниться маслами и смазками, что нельзя допускать. Вот по этой причине для хранения таких газов строятся сухие газгольдеры высокого давления.

Уроки аварий

Многочисленные отказы и особенно квазимгновенные разрушения вертикальных стальных резервуаров с нефтью и нефтепродуктами, произошедшие как в нашей стране, так и за рубежом, нередко приводили к чрезвычайным ситуациям, сопровождавшимся травмами и гибелью людей, значительными материальными потерями и нанесением большого ущерба окружающей природной среде. По статистике, общий материальный ущерб от таких аварий резервуаров превышает в 500 раз и более первичные затраты на их сооружение.



Рис. 8.22. Разрушение при испытаниях наливом воды

В литературе описан ряд аварий резервуаров, выполненных из кипящей стали, которая обладает хладноломкостью. В результате расследования причин аварий отмечалось, что большинство аварий произошло при пониженной температуре, трещины развивались из-за дефектов швов, дефектов листовой стали, а также из-за незначительных сотрясений стенки в месте разрыва сварного шва.

Анализируя подобные аварии. Министерством строительства СССР был отменен ГОСТ 2486-44, допускавший для резервуаров емкостью 4600 м^3 применение кипящей стали.

Неоднократно наблюдались разрушения не заполненных резервуаров под действием ураганного ветра, когда теряла устойчивость стенка резервуара (рис. 8.23).

Возможная авария большого резервуара может привести к разрушению соседних резервуаров, как это случилось, например, во время разрушения при испытаниях резервуара №3 Одесской нефтебазы. Тогда значительные повреждения получили и резервуары № 2, 4 та 5 (рис. 8.25, 8.26).



Рис. 8.25. Разрушение резервуара ветром



Рис. 8.26. Потеря устойчивости под действием внутреннего вакуума

Несколько других аварий резервуаров также произошло на стадии испытания. Причиной можно считать непродуманную организацию испытаний. Например, в 1953г. стальной сварной резервуар решено было испытать созданием избыточного давления внутри. Для этого резервуар был частично наполнен водой и загерметизированы все отверстия и патрубки. Позже, из-за ухудшения погоды, испытания были отложены. В связи с понижением температуры окружающего воздуха до 12°C внутри резервуара создалось сильное разрежение воздуха, которое в 15 раз превышало проектную нагрузку. В результате в стенке резервуара образовалась большая вмятина (длиной до 6 м).

а)



б)



Рис. 8.25. Разрушение резервуара №3: а – отброшены купол и стенка резервуара № 3; б – на старом месте осталось только днище резервуара № 3

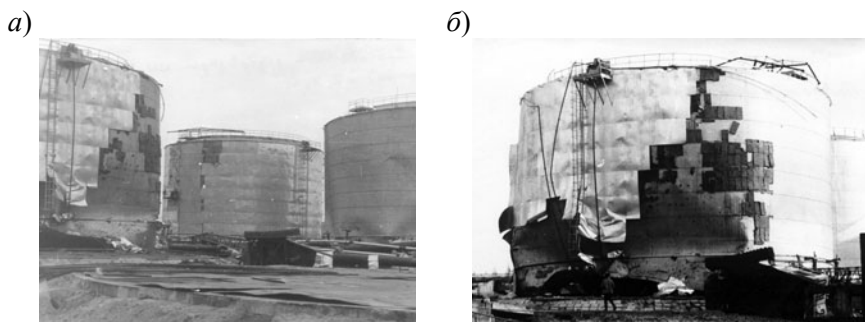


Рис. 8.26. Разрушение соседних резервуаров: *а* – вид на резервуары № 2, 4 и 5; *б* – повреждение резервуара № 2

Ряд аварий был вызван взрывами паров химических веществ, хранившихся в емкостях резервуаров. Чтобы предотвращать подобные взрывы, предложено было вводить в газовое пространство специальные газы, тормозящие или исключают процесс горения и взрывов (например, углекислый газ, дымовой газ и др.).

По статистическим данным, из зарегистрированных 318 случаев аварий на резервуарах, 65 связаны с частичным или полным их разрушением. Из общего числа случаев разрушений резервуаров 55,4% происшедших аварий сопровождались растеканием продукта за пределы территории промышленного объекта, и приводили к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом и гибелью людей.

На площадь разлива нефтепродуктов, которая по результатам реальных аварий составляла от 10 до 160 м² оказывало влияние сочетание многих факторов: свойства хранимой жидкости, поверхность производственной площадки и ее уклон, емкость аварийного резервуара, испарение, инфильтрация и др. В случае полного разрушения наземного резервуара прогнозируемая площадь растекания жидкости на местности пропорциональна максимальному объему хранимой в резервуаре жидкости. Для площадок с уклоном от 1% до 3% площадь растекания соответствует форме эллипса с расположением центра резервуара в одном из фокусов, максимальным радиус-вектором потока в сторону уклона местности, равным 6-10 диаметрам резервуара, при максимальной ширине потока по малой оси эллипса, равной 4-6 диаметрам резервуара.

По статистическим данным за последний полувековой период в России из 140 зарегистрированных случаев разрушений стальных резервуаров нормативные земляные обвалования выполнили свои функции только в 16,4% случаев. Поток жидкости разрушал, рассчи-

тываются только на статическое удержание вытекающей жидкости, земляные обвалования или защитные ограждения, промывал или перехлестывал через них, разливаясь на огромной площади (рис. 8.27).



Рис. 8.27. Разрушение обвалования

Очерк девятый. САМЫЕ-САМЫЕ

Когда речь заходит о знаменитых сооружениях, известных всему миру и ставших символом нации, сразу вспоминается пирамида Хеопса в Египте (единственное из семи чудес света, сохранившееся до наших дней), Эйфелева башня в Париже, Статуя Свободы в США. Даже в этот "малый джентльменский набор" попало два сооружения в металле. В этом очерке мы взяли в основу отбора объекты, которые не только поражают воображение туриста, но и оказали ключевое влияние на инженерию металлоконструкций, будучи либо предвестниками нового, либо завершающими некий этап развития.

Хрустальный дворец

Хрустальный дворец, построенный в Англии в 1851 г., был одним из тех сооружений, которые оказали заметное влияние на последующее развитие архитектуры и строительных металлоконструкций. Он во многом выходил за рамки традиционной для того времени строительной практики, что породило новые формы в архитектуре и новые принципы строительства зданий. Автором проекта самого здания был Джозеф Пакстон (Joseph Paxton), сын фермера, который с 1826 г. служил управляющим садов у герцога Devonширского и построил перед этим несколько больших оранжерей.

Сам по себе дворец был монументален в чисто количественном смысле. Он занимал площадь чуть меньше 72000 м². Его длина была 555 м, ширина 124 м, а с северной стороны он имел пристройку размером в плане 285×14,6 м. Центральный продольный неф, или "главный проспект", имел ширину 22 и высоту 20 м, а сводчатые трансепты (поперечный нефы) — соответственно 22 и 32,9 м.

Несмотря на эти внушительные размеры здания (рис. 9.1), его конструкция была поразительно простой. Основными ее элементами служили пустотелые чугунные колонны, соединенные связующими сквозными фермами, на которых держалась плоская крыша из застекленных панелей, образующих складчатый профиль. Единственными

сложными элементами этой простой каркасной конструкции были сводчатое перекрытие центральной части и диагональные стержни из ковкого железа, служившие для повышения жесткости всего сооружения. Хрустальный дворец стал первым в мире большим зданием с металлическим каркасом и первым зданием со стеклянными стенами.



Рис. 9.1. Хрустальный дворец в Лондоне

Все здание представляло собой выдающееся инженерное сооружение, возведенное из чугуна, железа и стекла. В этом здании, по-видимому, впервые была полностью применена модульная система планировки и стандартизированы отдельные детали конструкции. Модуль расстановки колонн в продольном и поперечном направлениях был принят одинаковым и равнялся 7,33 м. Для получения более крупных пролетов принимались кратные 7,33 м размеры в 14,66 и 21,99 м, что хорошо сочеталось с шагом колонн в окружающих нефы галереях.

Все колонны и балки пролетом до 7,33 м были сделаны из чугуна; для перекрытия больших пролетов применены фермы с перекрестной решеткой, сделанные из уголков и полосового железа. Все фермы пролетом 7,33 и 14,66 м были сделаны одной высоты — 0,915 м, что облегчало установку горизонтальных связей по всей длине здания. Характерной конструктивной особенностью всех ферм было то, что верхние и нижние пояса в середине фермы были примерно вдвое шире, чем у концов, где фермы соединялись с колоннами. Пояса ферм из ковкого железа постепенно утолщались к середине в процессековки; чугунные же фермы наращивались в середине приклепыванием дополнительных полос.

Чугунные балки и железные фермы перед укладкой их на места подвергались испытанию пробной нагрузкой, осуществляемой гидравлическими домкратами. Балки самых малых размеров, предназна-

ченные для удержания кровли, испытывались пробной нагрузкой в 9 т, а балки, поддерживающие галереи, — 15 т.

В конструкции дворца применена не виданная ранее система порталных связей для восприятия возникающих при ветре усилий (рис. 9.2), и, кроме того, впервые в мире крупнейшее сооружение было возведено из заранее изготовленных модулей.

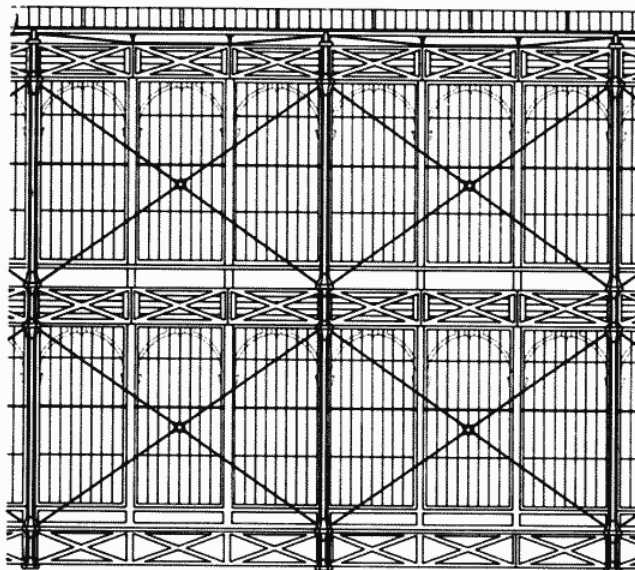


Рис. 9.2. Портальные связи Хрустального дворца

Портальная связь состояла из ферменной распорки и диагональных стержней. Существенно, что для обеспечения связевой конструкции Пакстон использовал вертикальную соединительную вставку из чугуна, которая закреплялась на верху колонны (рис. 9.3). Снизу и сверху соединительная вставка имела фланцевые выступы. Уширение на конце фермы входило в эти выступы, и простой установкой чугунного вкладыша в углублениях на выступах и на концах балки достигалось жесткое соединение. Таким способом низ и верх фермы очень просто и быстро присоединялись к колонне, придавая всей конструкции устойчивость к горизонтальным нагрузкам.

Идея использования связевой конструкции из металла в том виде, какой она имела в каркасном Хрустальном дворце, была заимствована из практики возведения деревянных строений. В больших железнодорожных дебаркадерах, которые в то время строились из металла, для обеспечения связи использовались дугообразные балки; что приводило к появлению возвышающихся крыш с крутыми уклонами. В противоположность этому весьма простая связевая конструкция по-

зволила построить из железа первое в мире каркасное здание с плоской крышей.

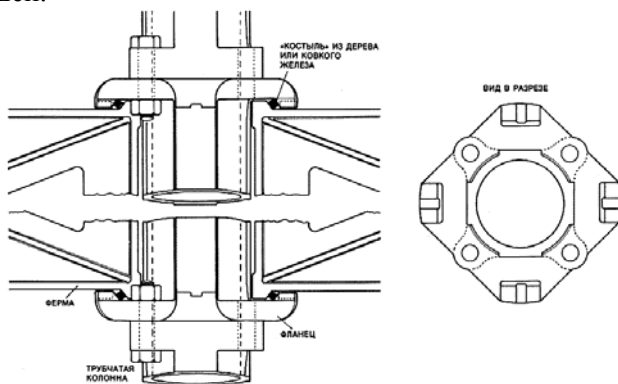


Рис. 9.3. Вертикальная соединительная вставка

Связевые конструкции с соединением на заклепках позже стали использоваться при возведении высотных зданий со стальным каркасом. В основе этого метода лежит опыт применения крепежных элементов в конструкции Хрустального дворца.

Хрустальный дворец строился в тот период, когда в развитии строительных конструкций с использованием металлических ферм намечалась новая тенденция. В частности, опыт строительства мостов узаконил ферму с параллельными поясами, и именно такие фермы были использованы в покрытии Хрустального дворца. При этом они не закрывались потолочными конструкциями (рис. 9.4), что явилось смелым новаторским шагом в архитектуре.

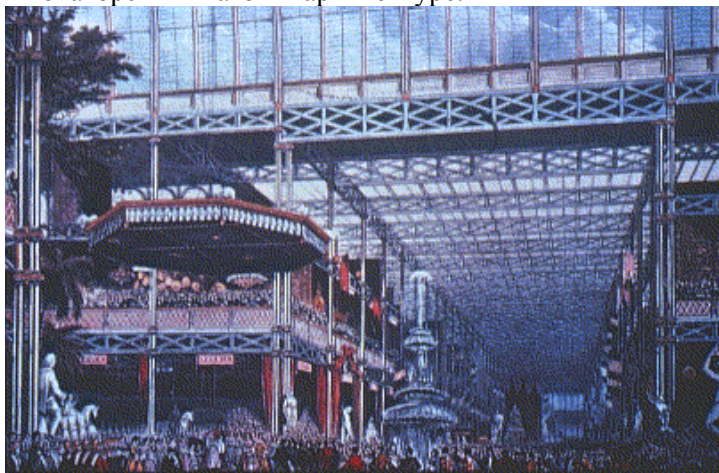


Рис. 9.4. Интерьер Хрустального дворца

Быстрому возведению дворца способствовал способ сборки, который не требовал сооружения лесов. Как только четыре колонны с помощью соединительных выступов сочленились с фермами, собранная конструкция приобретала жесткость и не нуждалась в дополнительном закреплении.

За счет широкого использования принципа взаимозаменяемости конструкций удалось добиться невиданного прогресса в технике строительства. В 1850 г. взаимозаменяемость была явлением новым и использовалась крайне редко и только в таких простейших случаях, как механизированное производство болтов и гаек. Что же касается Хрустального дворца, то взаимная связь форм и размеров отдельных конструктивных элементов достигла столь же высокой степени, как и в современных высотных зданиях.

Влияние Хрустального дворца на архитектуру современных ему зданий было самым непосредственным. Он послужил прообразом зданий функционально нового типа — больших выставочных павильонов. Сам Хрустальный дворец был задуман для демонстрации самых больших машин, показа широкой номенклатуры изделий с расчетом на присутствие огромного числа людей. Многие современные здания схожи со своим прототипом — дворцом Пакстона.

Некоторыми из наиболее значительных повторений Хрустального дворца были торговые пассажи и сводчатые галереи. Франция и Германия также заимствовали архитектурные принципы, заложенные в Хрустальном дворце. По его подобию в этих странах в конце XIX в. из стекла и металла возводились здания крупных универмагов.

В 1853 г. Хрустальный дворец был разобран и перевезен в южное предместье Лондона Сиденхем, где вновь был собран, при этом некоторые его размеры и конструкция отдельных частей были несколько изменены.

В 1936 г. в результате взрыва газа и вызванного им пожара дворец обрушился и сгорел, превратившись в груды развалин из железа, чугуна и расплавленного стекла.

Эйфелева башня

По случаю 100-летней годовщины Великой французской революции было решено устроить всемирную выставку. 1 мая 1886 г. открывается общепольский конкурс архитектурных и инженерных проектов, которые должны были определить архитектурный облик будущей

Всемирной выставки, а уже знаменитого своими мостами и куполами Густава Эйфеля в ней попросили поучаствовать безусловно.

В конкурсе участвовали 107 претендентов, большинство из которых предлагали различные проекты башен, как впрочем и Эйфель. Проект Эйфеля становится одним из четырех победителей, и тогда в него вносят окончательные изменения, обусловившие появление на свет этого символа Парижа и Франции.

Говорят, завоевав первую премию конкурса, Эйфель с энтузиазмом воскликнул: «Франция будет единственной страной, располагающей 300-метровым флагштоком!»

Сама идея башни принадлежала не Эйфелю, а двум его сотрудникам — Морису Кёхлену (Maurice Koechlin) и Эмилю Нугье (Émile Nouguier). Однако проект Нугье и Кёхлина (рис. 9.5) оказался слишком «сырым» в техническом отношении и не отвечал эстетическим требованиям, выдвигаемым к сооружениям Всемирной Парижской выставки, архитектура которых должна была быть более изысканной.

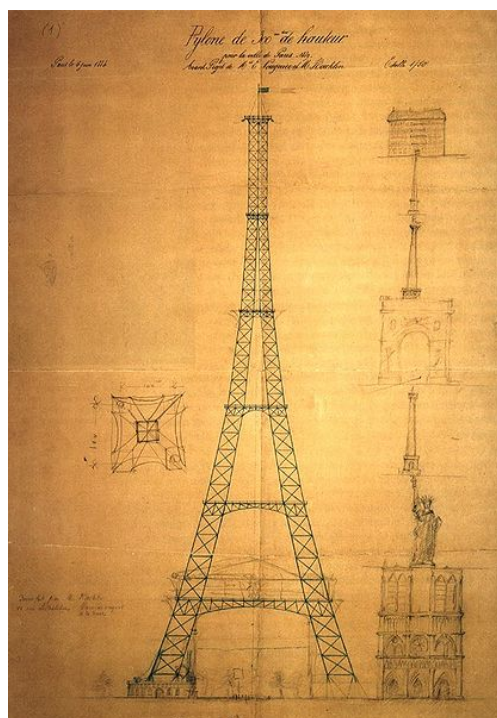


Рис. 9.5. Первоначальный проект Нугье и Кёхлина

Для того, чтобы башня более отвечала эстетическим вкусам требовательной парижской публики, архитектору Стефану Совестру

(Stephen Sauvestre) было поручено поработать над ее художественным обликом. Он предложил обшить цокольные опоры башни камнем, связать ее опоры и площадку первого этажа с помощью величественных арок, которые стали бы одновременно главным входом на выставку, разместить на этажах башни просторные застеклённые залы, придать верхушке башни округлую форму и использовать разнообразные декоративные элементы для ее украшения (рис. 9.6).

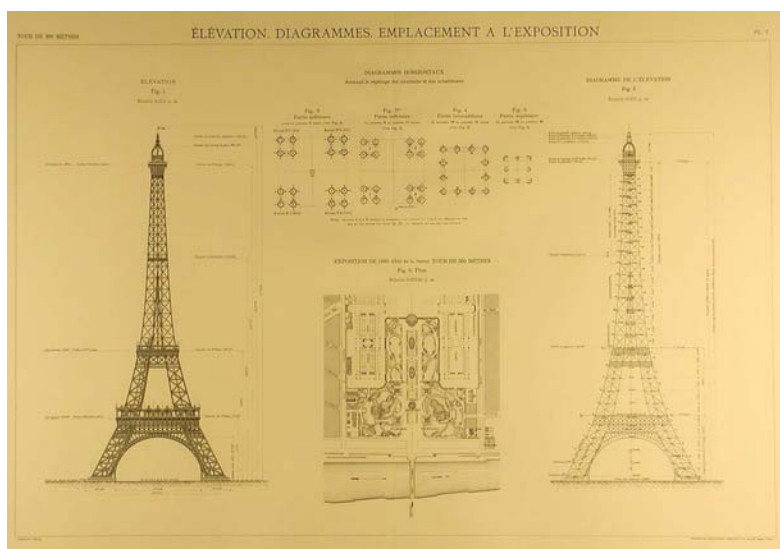


Рис. 9.6. Уточненный проект

Чтобы закончить башню в назначенный срок, Эйфель применял, большей частью, заранее изготовленные элементы. Отверстия для заклепок были просверлены на намеченных местах уже заранее, и две трети от 2,5 миллиона заклепок были поставлены заранее. При этом ни одна из заготовленных балок не весила больше 3 тонн, что обеспечивало поднятие металлических частей на предусмотренные проектом места.

В начале применялись высотные по тем временам краны, а когда конструкция переросла их, работу переняли специально сконструированные Эйфелем подъёмно-переставные краны (рис. 9.7).

Они двигались по рельсам, проложенным для будущих лифтов. (идея потом многократно использовалась при строительстве небоскребов). Сложность состояла и в том, что подъемное устройство должно было двигаться вдоль ног башни по изогнутой траектории с меняющимся радиусом кривизны.

Возведение башни требовало особого внимания к вопросам безопасности непрерывных работ, что и стало наибольшей заботой Эйфеля. На протяжении строительных работ не было ни одного смертельного случая, что являлось значительным достижением для того времени.



Рис. 9.7. Башня в процессе монтажа

Одной из самых сложных проблем для Эйфеля стала первая, нижняя, платформа. В начале монтажа мощные деревянные конструкции подмостей должны были удерживать 4 наклонные опоры и огромные балки первой платформы. Затем для окончательного совмещения сборных элементов башни воедино использовался следующий прием.

Четыре наклонные опоры покоились на наполненных песком тонкостенных металлических цилиндрах. Песок можно было постепенно выпускать и таким образом устанавливать опоры под правильным углом, но только единожды... Дополнительные гидравлические домкраты в фундаментах опор, правда, давали возможность заключительной регулировки положения 4-х наклонных опор, которые таким образом можно было точно выставить в проектное положение и совместить с деталями

крепления первой платформы. Как только платформа была установлена строго горизонтально и закреплена, домкраты были удалены.

Затем строительство продолжилось уже на самой башне. Работа продвигалась медленно, но непрерывно. Она вызывала у парижан, видевших растущую в небо башню, удивление и восхищение. А 31 марта 1889 года, меньше чем через 26 месяцев после начала рытья котлованов, Эйфель смог пригласить нескольких более-менее физически крепких чиновников к первому подъему на 1 710 ступеней.

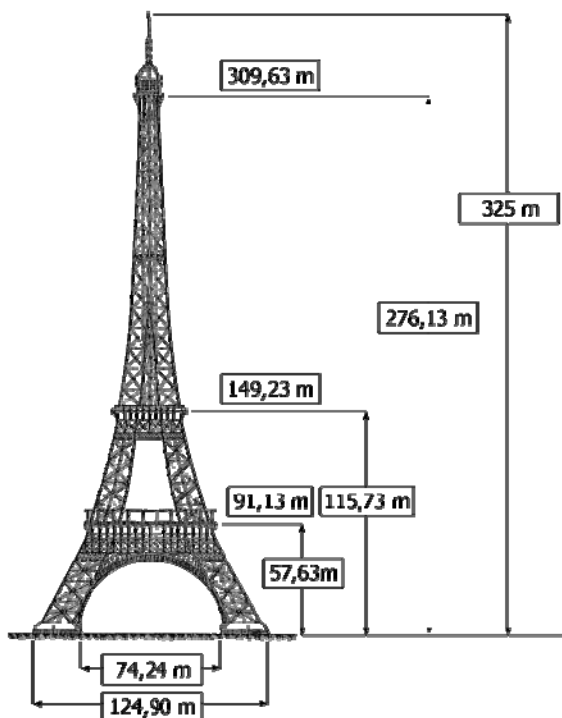


Рис. 9.8. Размеры Эйфелевой башни.

Вес металлических конструкции — 7 300 тонн (полный вес 10 100 тонн). Фундамент — монолитный бетон. Колебания башни от ветровой нагрузки не превышают 15 см. Колебания от неравномерного нагревания солнечным светом в июле — 18 см.

Нижний этаж представляет собой пирамиду (каждая сторона в основании длиной 129,2 м), образуемую 4 колоннами, соединяющимися на высоте 57,63 м арочным сводом; на своде находится первая плат-

форма Эйфелевой башни. Платформа представляет собой квадрат (65 м в поперечнике).

На этой платформе поднимается вторая пирамида-башня, образуемая также 4 колоннами, соединяющимися сводом, на котором находится (на высоте 115,73 м) вторая платформа (квадрат в 30 м в поперечнике).

Четыре колонны, возвышающиеся на второй платформе, пирамидально сближаясь и постепенно переплетаясь, образуют колоссальную пирамидальную колонну (190 м), несущую на себе третью платформу (на высоте 276,13 м) также квадратной формы (16,5 м в поперечнике); на ней высится маяк с куполом, над которым на высоте 300 м находится площадка (1,4 м в поперечнике). На башню ведут лестницы (1792 ступени) и лифты.

Первые лифты на башне приводились в действие гидравлическими насосами. Вплоть до нашего времени используются два исторических лифта фирмы "Fives-Lill", установленные в 1899 г. в восточной и западной опорах башни.

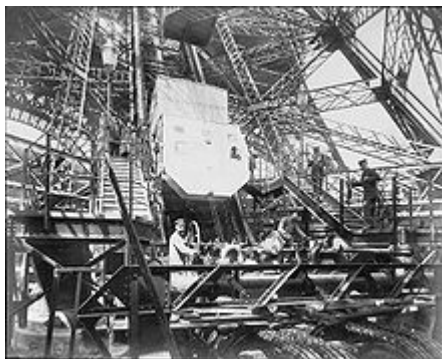


Рис. 9.9. Один из первых лифтов

На первой платформе были возведены залы ресторана; на второй платформе помещались резервуары с машинным маслом для гидравлической подъёмной машины (лифта) и ресторан в стеклянной галерее. На третьей платформе размещались астрономическая и метеорологическая обсерватории и физический кабинет. На вершине был установлен маяк.

Первоначальный договор с Эйфелем подразумевал демонтаж башни через 20 лет после постройки. Но в октябре 1898 года Эжен Дюкрете провёл первый сеанс радиотелеграфной связи, а в 1903 году генерал Феррье применил её для своих экспериментов. И башню оставили сначала для целей военной радиосвязи.

С 1906 г. на башне постоянно размещена радиостанция. В 1921 году состоялась первая непосредственная радиопередача с Эйфелевой башни. С 1922 года стала регулярно выходить радиопрограмма, которая так и называлась «Эйфелева башня». В 1925 году предприняты первые попытки ретранслировать с башни телевизионный сигнал. Передача же регулярных телевизионных программ началась с 1935 года. С 1957 года на башне располагается телевизионная антенна, увеличивающая высоту конструкции до 320,75 м.

Строительство Эйфелевой башни вызывало много кривотолков, а окончание строительства было встречено волной критики. Газеты были заполнены сердитыми письмами от деятелей искусств Парижа. Романист Ги де Мопассан — который утверждал, что ненавидел Эйфелеву башню — каждый день завтракал в ресторане, который был в ней расположен. Когда его спросили, почему, он ответил, что это единственное место в Париже, где он мог не видеть ее.

Гиперболоид инженера Шухова

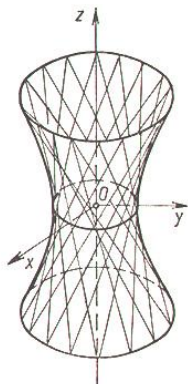
Стальные сетчатые конструкции за последние лет пятьдесят стали вполне привычными в мегаполисах. А ввел их в архитектуру инженер В.Г. Шухов, который впервые в мировой строительной практике предложил применять стальные сетчатые оболочки для строительства башен и зданий. Он решился ввести в архитектурный стиль новую форму однополостного гиперболоида вращения, на основе которого создаются стержневые металлоконструкции, поскольку одним из основных свойств таких гиперболоидов является то, что через каждую точку их поверхности проходят две прямолинейных образующих (рис. 9.10,а).

Стержень, установленный вдоль линейной образующей, должен быть закручен, чтобы обеспечить его примыкание к кольцевым диафрагмам (рис. 9.10,б). Поэтому в конструкции используются либо трубчатые элементы, которые не нуждаются в закручивании, либо элементы из уголков или швеллеров, обладающие очень малой крутильной жесткостью.

В. Г. Шухов получил патент Российской империи на привилегию «Ажурная башня» № 1896 от 12 марта 1899 г., заявлен 11 января 1896 года. В заявке на привилегию Шухов так разъяснял принцип конструкции: «Сетчатая поверхность, образующая башню, состоит из прямых деревянных брусьев, брусков, железных труб, швеллеров или уголков, опирающихся на два кольца: одно сверху, другое внизу башни; в местах пересечения брусья, трубы и уголки скрепляются между собой. Составленная таким образом сетка образует гиперболоид вращения, по поверхности которого проходит ряд горизонтальных

колец. Устроенная вышеописанным способом башня представляет собой прочную конструкцию, противодействующую внешним усилиям при значительно меньшей затрате материала».

а)



б)

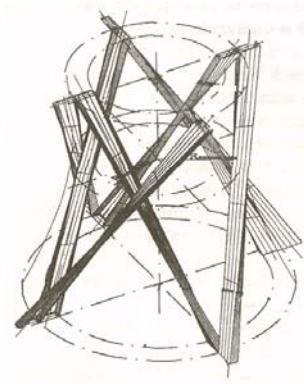


Рис. 9.10. Гиперboloидная конструкция: а – геометрический принцип, б – закручивание стержня

Первая в мире гиперboloидная башня была построена на Всероссийской художественно-промышленной выставке в Нижнем Новгороде в 1896 году. Принцип устройства гиперboloидных башен В. Г. Шухов использовал в сотнях сооружений: водонапорных башнях (рис. 9.11), опорах линий электропередачи, мачтах военных кораблей и других конструкциях. Было построено очень много таких сооружений.



Рис. 9.11. Водонапорная башня системы Шухова

К началу XX века уровень, которого достигла металлообработка в России, позволил задуматься о воплощении в жизнь грандиозного сооружения, каким стала Радио-башня (известная также как Шуховская башня, Шаболовская башня).

Уже весной 1919 года В.Г. Шухов разработал проект девятисекционной гиперboloидной конструкции башни, которая при высоте 350 м весила бы всего 2200 тонн, т. е. почти в три раза меньше 305-метровой башни Эйфеля. Последняя была собрана из 12000 кусков различной формы, для шуховского гиперboloида были нужны простые прокатные профили. Но металла в разоренной стране не было, и фантастически прекрасный проект не осуществился. Банальная нехватка металла вынудили автора изменить проект на более скромный (высотой всего 148,3 метра).

Строительство уникальной гиперboloидной конструкции, которая имела вид несущей стальной сетчатой оболочки, было начато в Москве на улице Шаболовка 14 марта 1920 года и закончено в 1922 году.

Шуховская башня имеет оригинальную изящную сетчатую конструкцию (рис. 9.12,*а*), благодаря чему достигается минимальная ветровая нагрузка, представляющая главную опасность для высоких сооружений. По форме секции башни — это однополостные гиперboloиды вращения, сделанные из прямых стержней, упирающихся концами в кольцевые основания.

а)



б)

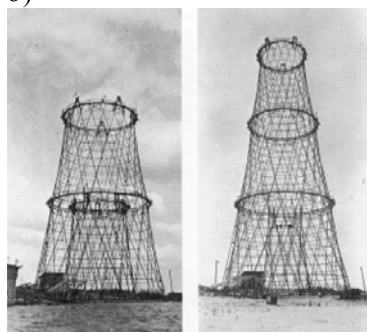


Рис. 9.12. Шуховская башня на Шаболовке: *а* — вид снизу; *б* — монтаж

Круглый корпус башни состоит из 6 секций высотой 25 метров каждая. Нижняя секция установлена на бетонном фундаменте диаметром 40 метров и глубиной 3 метра. Элементы башни скреплены на заклёпках.

Корпус башни состоял из 6 секций в виде круглого конуса, высота каждой — 25 метров. После установки двух дополнительных траверз

и флагштока её высота достигла 160 метров, при этом высота основания над уровнем моря — 131 метр.

Башню строила организованная Шуховым артель мастеров и рабочих, возглавляемая прорабом Галанкиным. Работы шли круглый год: и в жару, и в дождь, и в суровую стужу, когда костюмы верхолазов покрывались коркой льда. В таких условиях изобретенный Шуховым "телескопический" метод монтажа конструкций (рис. 9.12,б), позволивший отказаться от применения строительных лесов, сложного подъемного оборудования и свести к минимуму работы на высоте, имел первостепенное значение. Строительство башни велось без лесов и подъемных кранов. Верхние секции по очереди собирались внутри нижней и при помощи блоков и лебедок поднимались друг на друга. Для того, чтобы при подъеме можно было пронести секцию через верхнее кольцо уже смонтированной части башни, нижнее кольцо поднимаемой секции не замыкалось и секция слегка деформировалась на время подъема.

Подъем второй и третьей секций прошел прекрасно, подтвердив правильность расчетов. И вдруг случилось несчастье. В дневнике Шухова значилось: "29 июня 1921 года. При подъеме четвертой секции третья сломалась. Четвертая упала и повредила вторую и первую в семь часов вечера". Спустя два года все приходилось начинать сначала. Лишь по счастливой случайности в аварии не пострадали люди.

В.Г. Шухова признали виновным и условно приговорили к расстрелу, дальновидно отсрочив исполнение до окончательного завершения строительства. Монтаж последних несущих конструкций завершили к началу марта 1922 года, а уже 19 марта состоялась первая трансляция радиопередач.

В 1939 году башня подверглась суровому испытанию: почтовый самолет из Киева в результате неисправности задел за толстый трос, который был протянут под углом от вершины башни до земли. Здесь он был намотан на лебедку, установленную на бетонном основании. Трос остался после строительства башни, висел несколько лет, никому не мешал и никто им не пользовался. Самолет крылом задел за трос, лебедку вырвало из земли, башня получила сильный удар, а самолёт развалился на куски и упал неподалеку во дворе жилого дома. Проведенная экспертиза показала, что башня достойно выдержала удар, и даже не потребовался её ремонт.

С 10 марта 1939 года с Шуховской башни впервые передали в эфир документальный фильм. С этого момента телевизионные трансляции осуществлялись регулярно, четыре раза в неделю по 2 часа. А уже к весне 1939 года в Москве насчитывалось свыше 100 телевизоров марки ТК-1, регулярно принимавших передачи телецентра на Шаболовке. Не удивительно, что её изображение на долгие годы ста-

ло заставкой многих телепередач (например, знаменитый «Голубой огонёк») и эмблемой всего советского телевидения.

Современная сварка и резка металла, удешевление производства и развитие транспортной системы, по сравнению с 20-ми годами, сделали популярным строительство сетчатых гиперboloидных конструкций. Так, в японском порту города Кобе в 1963 году была возведена 108-метровая башня с использованием шуховской технологии. Чешский архитектор Карел Хубачек спроектировал и построил в 1968 году 100-метровую гиперboloидную башню. В Цюрихе архитекторы Александр Ком и Даниэль Рот в 2003 году вновь применили принцип гиперboloидной башни Шухова.

Эмпайр Стейт Билдинг

Эмпайр Стейт Билдинг (рис. 9.13) — это один из старейших небоскребов мира, построенный в 1931 году по проекту архитектурного бюро «Шрив, Лэм и Хармон» (“Shreve, Lamb&Harmon”). На сегодняшний день здание, несмотря на свой почтенный возраст, занимает 10-ю строчку в списке самых высоких сооружений планеты. Стоит отметить, что Эмпайр Стейт Билдинг является вторым по величине среди всех зданий США и уступает лишь чикагской башне Сирз.

Строительство Имперского Здания, а именно так переводится с английского Empire State Building, началось в эпоху Великой Депрессии, и всего лишь 1 год и 3 месяца, а точнее 410 дней, потребовались, чтобы дать жизнь 381-метровому исполину.

На объекте было задействовано свыше 3400 рабочих. Возведение 102-этажного небоскреба шло ускоренными темпами. Каждую неделю бригады сдавали по 4,5 этажа, а в наиболее острые периоды высотной гонки строителям приходилось работать практически круглосуточно, чтобы двинуться со скоростью 14 этажей в 10 дней. Сегодня нам покажется странным, как почти 100 лет назад было возможным, с использованием простых технологий и скромных знаний в инженерии, построить такого гиганта.

Здание содержит 102 этажа, из которых 85 занимают офисы, а остальные 16 уровней используются для технических нужд. На 86-ом этаже организована смотровая площадка, дающая обзор в 360 градусов. Еще одна смотровая площадка есть на 102-ом этаже — она меньше по размеру и вид с нее не такой богатый, как хотелось бы. По данным владельцев здания обзорные площадки за время существования небоскреба посетили свыше 110 млн. человек из разных стран мира.



Рис. 9.13. Эмпайр Стейт Билдинг

Эмпайр Стейт Билдинг является довольно тяжелой конструкцией, ведь основная часть здания выполнена из стали и камня. Вес небоскреба составляет 331 тысячу тонн. Чтобы выдержать такую махину, строителям пришлось сформировать двухуровневый коробчатый фундамент площадью в 8000 кв. м.

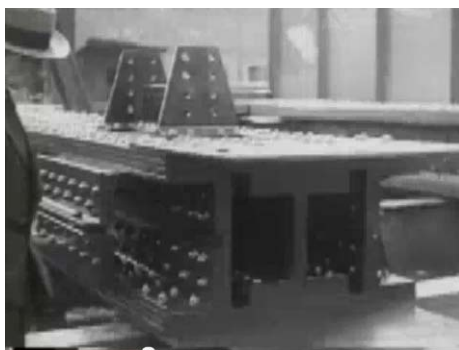


Рис. 9.14. Сечение колонны

Основной несущей конструкцией здания является стальной каркас в виде пространственной рамы, общий вес стальных конструкций составляет 57 тысяч тонн. Ригели и стойки изготовлены из широко-

полочных двутавров, при этом колонны в нижней части здания усиливаются стальными листами, приклепанными к двутаврам (рис. 9.14).

Торцы колонн фрезеровались (рис. 9.15), что обеспечивало высокую точность геометрии каркаса.

При строительстве Эмпайр Стейт Билдинг внешние леса не использовались, что очень удешевило и ускорило возведение здания. На высоте работали квалифицированные монтажники и клепальщики (рис. 9.16), работа шла без использования монтажных поясов, тем не менее за все время строительства было зафиксировано только 5 несчастных случаев со смертельным исходом.

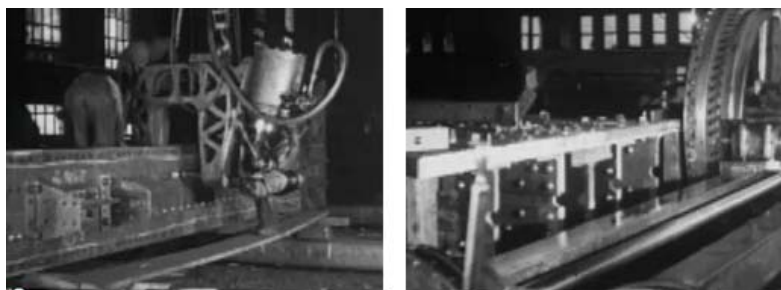


Рис. 9.15. Изготовление колонн слева — клепка, справа — фрезеровка торцов

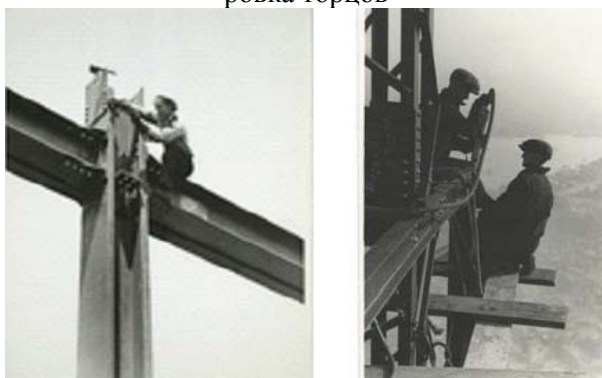


Рис. 9.16. Работа на высоте

Еще до того, как на крыше небоскреба разместили телерадиовышку, планировалось, что верхняя часть Эмпайр Стейт Билдинг будет служить причалом для пассажирских дирижаблей, 102-й этаж был причальной платформой со сходнями для подъема на дирижабль. Специальный лифт, курсирующий между 86-м и 102-м этажами, мог использоваться для перевозки пассажиров, регистрация которых должна была производиться на 86-м этаже. В реальности ни один

дирижабль на крыше Эмпайр Стейт Билдинг так и не пришвартовался. Идея воздушного терминала оказалась небезопасной — сильные и нестабильные воздушные потоки наверху 381-метрового здания делали причаливание очень сложным. А вскоре дирижабли в принципе перестали использоваться как транспортное средство.

Здание выдержало жесткое испытание, когда 28 июля 1945 года бомбардировщик ВВС США В-25 «Митчелл», пилотируемый в густом тумане подполковником Уильямом Смитом, врезался в северный фасад здания между 79 и 80-ым этажами. Один из двигателей пробил башню насквозь и упал на соседнее здание, другой свалился в шахту лифта. Пожар, возникший в результате столкновения, был потушен уже через 40 минут. В инциденте погибло 14 человек. Несмотря на это происшествие, здание не было закрыто, и работа в большинстве офисов на следующий рабочий день не остановилась.

Мост Золотые ворота

Мост Золотые Ворота (Golden Gate Bridge) — висячий мост через пролив Золотые Ворота (рис. 9.17). Он соединяет город Сан-Франциско на севере полуострова Сан-Франциско с пригородом Саусалито. Мост Золотые Ворота был самым большим висячим мостом в мире с момента открытия в 1937 году и до 1964 года. Длина моста — 1970 м, длина основного пролёта — 1280, высота опор — 230 м над водой, масса — 894 500 т. От проезжей части до поверхности воды — 67 м. Это один из самых узнаваемых мостов в мире.



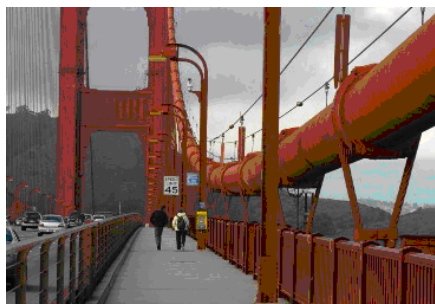
Рис. 9.17. Общий вид Golden Gate Bridge

Проект моста подготовил инженер Джозеф Строусс, все математические вычисления для моста сделал Чарльз Альтон Эллис, но из-за плохих отношений между ним и Джозефом Строуссом имя Эллиса не фигурирует в строительстве моста и не вписано в табличку строителей моста на южной башне.

Пролетное строение поддерживается двумя кабелями (рис. 9.18) каждый — из 27 572 параллельных оцинкованных стальных проволок, связанных в 61 прядь, образующих кабель диаметром 920 мм, площадь сечения 535 482 мм². Стрела провеса кабелей 144,8 м. Для заделки анкораж кабелей соорудили специальные бетонные массивы.

Стальные пилоны, поддерживающие кабели, имеют высоту 213 м, считая от верха быков, в которые они заделаны. Каждый пилон состоит из двух стальных башен коробчатого сечения, отстоящих от оси на расстоянии 27,4 м и соединенных между собою выше проезжей части четырьмя горизонтальными решетчатыми распорками без диагоналей, которые по эстетическим соображениям было решено не ставить.

а)



б)



Рис. 9.18. Основной кабель: а — общий вид, б — демонстрационный фрагмент

Ниже проезжей части башни соединены между собою диагоналями и распорками. Сечение башен утончается по направлению снизу вверх уступами от площади 48 561 см² до площади 25 129 см². В целях эстетических распорки с обеих сторон обшиты волнистыми листами меди, скрывающими элементы их решетки.

Пролетное строение подвешено к главным кабелям при помощи кабельных двойных подвесок диаметром 73 мм. Подвески размещены в расстояниях 15,24 м друг от друга. Для прикрепления к кабелю подвеска обхватывает последний при посредстве специальной стальной муфты, обжимающей кабель (рис. 9.19).

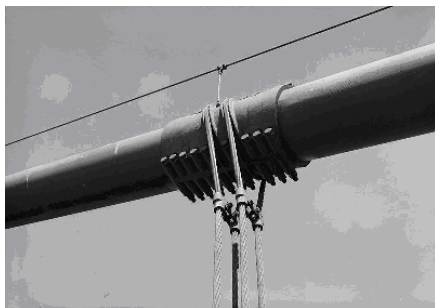


Рис. 9.19. Крепление подвесок к кабелю

Фермы жесткости (рис. 9.20) имеют высоту 7,62 м и панель такой же длины. Пояса ферм параллельные, решетка треугольная с дополнительными стойками. Фермы жесткости связаны между собою в боковом направлении поперечными клепаными балками высотой 2,59 м, расположенными в каждой панели, и диагональными связями, расположенными в плоскости нижних поясов поперечных балок. По поперечным балкам проложено 14 продольных прокатных балок высотой 610 мм, поддерживающих настил проезжей части.

Для пилонов допущено напряжение в 1680 кг/см^2 . В поясах и связях ферм жесткости допущено напряжение в 2240 кг/см^2 . В поясах балок проезжей части принято напряжение в 1540 кг/см^2 .



Рис. 9.20. Фермы жесткости

Строительство моста началось 5 января 1933 года и продолжалось более 4 лет. Во время своего путешествия по Америке строительство

посетили И. Ильф и Е. Петров. Вот как это описано в «одноэтажной Америке»:

Мы отважились совершить вдоль троса небольшое путешествие. Чувствуешь себя там, словно на крыше небоскреба, только с той разницей, что под ногами нет ничего, кроме тонкой проволочной сеточки, сквозь которую видны волны залива. Дует сильный ветер. Хотя путешествие было совершенно безопасным, мы с отчаяньем охватили руками трос.

- Прекрасный трос, - подтвердил мистер Адамс, не выпуская из рук стальной опоры.

- Трос сплетен из семнадцати с половиной тысяч тонких стальных проволок, - разъяснил нам наш провожатый. Мы пришли в восторг от этой цифры и уцепились за трос с еще большей силой.

- Сэры, - сказал нам мистер Адамс, глядя в небо и почти повиснув на тросе, - мне еще никогда не приходилось видеть такого троса. Это - Семнадцать с половиной тысяч! - Нет, серьезно, сэры, такого троса никогда не было в мире. И мистер Адамс с нежностью погладил стальной канат.

- А теперь мы подыдем еще выше, - предложил проводник, - до самой вершины пилона. Но нас невозможно было оторвать от троса. - Ай-ай-ай, какой трос! - восклицал мистер Адамс.

- Нет, нет, сэры, вы только посмотрите, какой он толстый! Сколько проволочек? - Семнадцать с половиной тысяч, - сказал проводник.

Прямо не хочется от него уходить, - заметил мистер Адамс. - А мы и не уйдем от него. Ведь мы будем подыматься вдоль троса, наивно сказал проводник. - Нет, нет, сэры, в этом месте трос особенно хорош!

- О, но! Но, сэры, это чудесный трос! Вы только взгляните, какая безукоризненно тонкая и в то же время прочная работа.

- Прекрасный, прекрасный трос, - бормотал он, - запишите в свои книжечки.

- Не хотите ли посмотреть консольный пролет восточной части моста? - предложил проводник. - Нет, нет, сэр! Что вы! О, но! Нет, серьезно, это чудный трос! Мне ужасно нравится. Да, да, да, отличный, превосходный трос! Интересно было бы знать, из какого количества проволочек он составлен? - Из семнадцати с половиной тысяч, - сказал проводник печально.

Он понял, что мы больше никуда не пойдем, и предложил спуститься. Весь обратный путь мы проделали, не выпуская троса из рук и восхищаясь его небывалыми качествами. Только очутившись на твердой скалистой земле острова Йерба-Буэна, мы поняли, что такое героизм людей, которые, весело посвистывая, сплетали трос над океаном.



Рис. 9.21. Сборка кабеля из прядей

27 мая 1937 года в 6 часов утра мост Золотые Ворота открыли — для пешеходов. Первые 12 часов он принадлежал только им. На следующий день по сигналу президента Рузвельта, поступившему из Белого дома, на мост въехали первые автомобили.

1 декабря 1951 года мост Золотые Ворота прошел внеплановое испытание, в этот день штормовой ветер достиг огромной скорости в 130 км в час. Основной пролет моста отклонился на 8 метров в горизонтальной плоскости и на 2 метра в вертикальной, но даже это не вызвало серьезных повреждений.

Мост Золотые ворота до сих пор находится в эксплуатации и является одной из туристических достопримечательностей не только Сан-Франциско, но и США.

Олимпийский стадион в Мюнхене

В 1968-72 годах по проекту архитектора Гюнтера Бениша (Günther Behnisch) и инженера Фрей Отто (Frei Otto) был построен многофункциональный стадион в Мюнхене.

Трибуны стадиона и часть территории олимпийского парка покрыты вантовыми оболочками, имеющими рекордные для таких конструкций размеры (рис. 9.22). В 1972 году стадион был главной ареной летних Олимпийских игр.



Рис. 9.22. Стадион в Мюнхене

Вантовое покрытие над Олимпийским комплексом в Мюнхене имеет площадь 74 800 кв.м. Несущая часть висячего покрытия, вантовая сетка, была подвешена к 12 стальным трубчатым мачтам высотой от 51 до 72 м, диаметром 3,5 м при толщине стенки 70 мм. В узлах сетки крепились светопрозрачная кровля из органического стекла.

На рис. 9.23 показан фрагмент конструкции, из которого можно увидеть принцип образования опорной системы из высоких и низких мачт, расположение анкеров и трос-подбора.

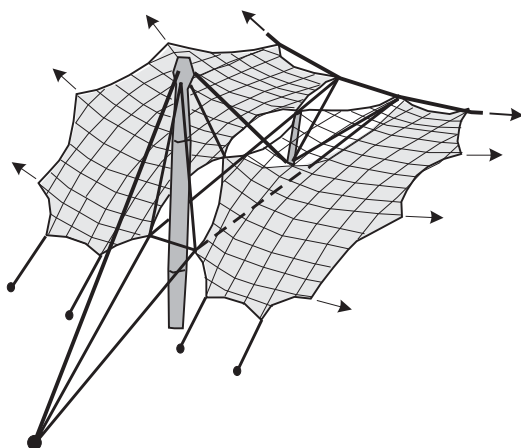


Рис. 9.23. Конструктивная схема (фрагмент)

В отличие от известных тросовых сеток, натянутых на замкнутый жесткий контур, в этой конструкции использовался гибкий контур (трос-подбор) достаточно сложной конфигурации.

Сеть сконструирована из парных тросов, в местах их пересечения установлены алюминиевые соединители (клямеры), предотвращающие абразивный износ тросов от скольжения один по другому (рис. 9.24). Другие узлы этой конструкции показаны на рис. 6.25).

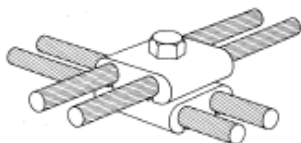


Рис. 9.24. Клямер



Рис. 9.25. Узлы вантовой системы

Для устройства кровли использовалась система прозрачных пластмассовых панелей с толщиной 4 мм и размером $2,90 \times 2,90$ м. Панели были закреплены к кабельной сетке гибкими связями, чтобы предотвратить повреждение кровли при перемещениях сетки под воздействием неравномерных нагрузок. Стыки между панелями были уплотнены непрерывными неопревыми профилями, как это представлено на рис. 9.26.

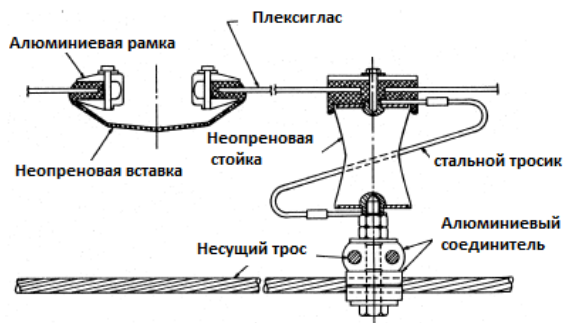


Рис. 9.26. Крепление кровельных панелей

Ввиду сложности геометрической формы, а также из-за математических трудностей расчета при проектировании интенсивно использовалось физическое моделирование.

Пионером здесь был Фрей Отто, который выполнил обширные эксперименты, используя множество различных методик и моделей, включая мыльную пленку, ткань и проволочные модели.

В процессе проектирования были построены крупномасштабные рабочие модели (рис. 9.27), которые испытывались в Институте легких конструкций в Штутгарте под руководством профессора Леонгарда (Leonhardt).



Рис. 9.27. Испытания модели

К сожалению, Мюнхенский стадион оставил в памяти не только спортивные и архитектурные достижения 1972 года. Тогда же мир столкнулся с политическим терроризмом, повлекшим гибель одиннадцати членов олимпийской команды Израиля.

Купол Фуллера

Первые купольные сооружения в металле были ребристыми, как чугунный купол Исаакиевского собора в Санкт Петербурге (1840 г.) или ребристо-кольцевыми. Их развитием стали купол Шведлера, о котором говорилось выше, купол Феппля, купол Шлинка, купол Циммермана и их разновидности.

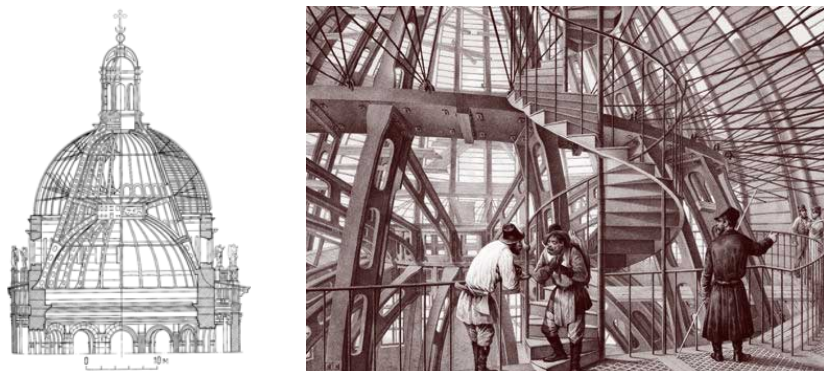


Рис. 9.28. Строительство купола Исаакиевского собора

Однако поистине новое слово в куполостроении было сказано лишь чуть более полувека назад. Речь идет о так называемых геодезических куполах, придуманных еще в 1919 году немцем Вальтером Бауэрсфельдом (Walther Bauersfeld)¹, а затем (независимо от него) в 1951 году – американцем Ричардом Бакминстером Фуллером (Richard Buckminster Fuller), который и считается их «отцом». Название связано не с геодезией как научно-прикладной дисциплиной, а с термином «геодезическая линия» – то есть линия, соединяющая по кратчайшему пути две точки на заданной поверхности. Для сферы геодезической линией является дуга большого круга.

В основе построения Фуллера лежит додекаэдр, вершины и центральные точки граней которого проектируются на описанную сферу. Полученные на сфере точки соединяются дугами большого круга (геодезическими), что дает исходную сеть из шестидесяти одинаковых сферических треугольников. Каждый треугольник можно разбить на более мелкие (рис. 9.29,а), линии разбивки исходных треугольников также прокладываются по дугам большого круга.

Сфера или полусфера, представляющие собой структуры из сочлененных металлических треугольников, будет сочетать в себе устойчивость и прочность с легкостью и ажурностью.

При кажущейся простоте геодезических конструкций их расчет, если речь идет о крупных объектах, не просто осуществить вручную. Ключевое понятие – частота, то есть количество сочлененных многоугольников, вписанных в исходную структурную единицу (например,

¹ *Бауэрсфельд* накрыл этим куполом здание планетария в Йене для оптической компании Карла Цейса (Carl Zeiss), но чтобы получить гладкую поверхность для искусственного вечернего неба, Франц Дишингер (Franz Dischinger) закрыл стальной каркас торкрет-бетоном.

треугольник большего размера). Чем мельче «сетка», тем купол ближе к сферическому.

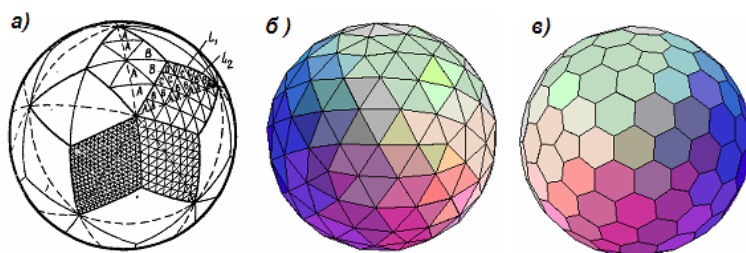


Рис. 9.28. Геометрическая схема

Треугольной сетке (рис. 9.29,б) соответствует двойственная ей сетка из шестиугольников, которые получаются при соединении друг с другом центров треугольников (рис. 9.29,в).

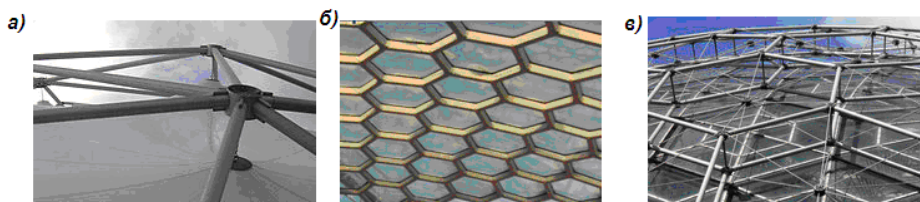


Рис. 9.30. Стержневые наборы геодезического купола

На практике геодезический купол состоит из металлических стержней, имеющих точно рассчитанную длину и соединенных друг с другом под определенными углами. Конструкция, составленная из шарнирно соединенных в узлах треугольников (рис. 9.30,а), является неизменяемой. А стержневая система из шарнирно соединенных в узлах шестиугольников геометрически изменяема, поэтому узлы следует делать жесткими (рис. 9.30,б), либо предусматривать раскосы (рис. 9.30,в).

Не известно, знал ли Фуллер о работах Бауэрсфельда, но с 1947 года он начал разрабатывать пространственную конструкцию геодезических куполов и впоследствии получил на них несколько патентов США.

Еще в 1951 году Фуллер построил первый большой купол в Кабуле — в качестве павильона США на Международной торговой выставке. Это было сооружение из алюминиевых труб диаметром 30 метров и площадью основания 8 тыс. квадратных футов. В Афганистане купол был собран несколькими неквалифицированными рабочими, не знавшими английского языка, но сумевшими соединить вме-

сте помеченные цветным кодом элементы конструкции. Геодезический купол вызвал у посетителей выставки гораздо больший интерес, чем размещенные в нем экспонаты ...



Рис. 9.31. «Золотой купол» выставочного павильона в Москве

В 1954 году Генри Форд заказал постройку геодезического купола для штаб-квартиры Ford Motors. В 1958 году был возведен геодезический купол «The Climatron» для тропического ботанического сада в Сент-Луисе, а в 1959 году геодезический купол накрыл выставочный павильон США в Москве (рис. 9.31).

В 1967 еще более грандиозный геодезический купол был построен для павильона США на выставке «Экспо-67» в Монреале. Впоследствии павильон был переоборудован в музей «Биосфера» (рис. 9.32).



Рис. 9.32. Музей «Биосфера» в Монреале

Авторы проекта павильона Соединенных Штатов на Всемирной выставке Экспо-67 в Монреале выбрали в качестве несущей конструкции сооружения купол высотой 60,8 и диаметром 76 м. Чтобы отойти от привычной конфигурации в виде полусферы, которая оставляла бы впечатление приземистого сооружения, был выбран стержневой многогранник, представляющий собой пространственную конфигурацию, вписанную в $3/4$ сферы, что наилучшим образом соответствовало местному ландшафту.

Как и в большинстве конструктивных решений куполов Фуллера, проектировщиками использовался трехмерный модуль с образованием треугольной сети на внешней поверхности сферы и шестиугольной – на внутренней. Соединение между собой структурообразующих элементов создает пространственную стержневую конструкцию в форме многогранного купола (рис. 9.33).



Рис. 9.33. Модульные элементы и конструкция узлового соединения



Рис. 9.34. Купол у Южного полюса

Внушительные размеры имела большепролетная конструкция геодезического купола, построенного осенью 1958 года в г. Батон-Руж (штат Луизиана). Этот купол имеет диаметр 116,7 и высоту 39 м. Перекрываемая площадь составляет примерно 10740 м^2 , а его общая масса оказалась равной 1200 т.

По всему миру построено более 300 тысяч куполов системы Фуллера, разнообразных по размерам, материалу и функциональным возможностям. Можно лишь упомянуть купол антарктической полярной станции Амундсена-Скотта (рис. 9.34) и сферическое сооружение павильона «Космос Земля» в Дисней Ленде (рис. 9.35).

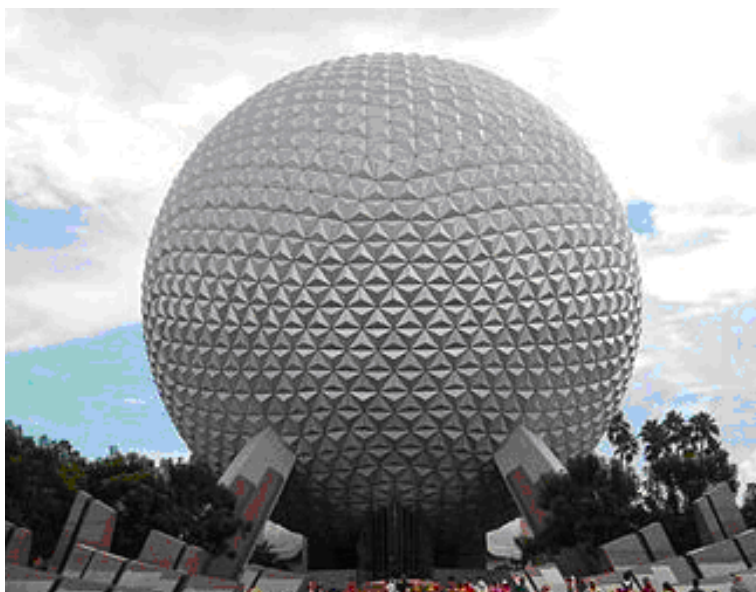


Рис. 9.35. Павильон «Космос Земля»

Павильон в Диснейленде – пример полной геодезической сферы. Сфера выбрана Фуллером как геометрическое тело с максимальным соотношением объема к площади поверхности. Следовательно, из всех зданий с заданным объемом именно геодезическая сфера будет иметь наименьшую площадь поверхности границы с окружающей средой, что минимизирует тепловые потери.

Самое большое производственное здание

Производственные здания привлекают к себе меньшее внимание публики, они не конкурируют в этом смысле с башнями, небоскребами и другими общественными сооружениями. Но и среди производственных зданий имеются свои рекорсмены.

Завод фирмы Боинг в Эверетте

Этот монстр (рис. 9.36) не только самый большой среди металлических зданий в мире, это самое большое здание из всех существующих типов. Иными словами, большего здания в мире попросту не существует. Объем пространства ангара составляет 17 млн. кубических метров, а площадь около сорока гектаров, ангар записан в Книгу рекордов Гиннеса как самое большое здание по объему.



Рис. 9.36. Общий вид здания в Эверетте

Здание строилось в три этапа и сегодняшний вид оно приобрело в 1990 г., когда появилась необходимость сборки Боингов-777. На заводе осуществляется сборка пассажирских лайнеров Боинг-747, Боинг-767, Боинг-777 (рис. 9.37).

Здание рассчитано на одновременную сборку 25 штук 747-х Боингов – самых больших пассажирских авиалайнеров в мире, впрочем, здание вполне сойдет и под одновременное проведение 74 футбольных матчей – именно столько футбольных полей поместится на этой огромной площади. В нем работает 24 000 человек, а инфраструктура

включает 21 столовую, медицинскую клинику, пожарную станцию и даже детский сад.

Общая площадь здания 398000 м², объем помещений внутри здания 13,3 млн. м³.



Рис. 9.37. Сборка Боингов

Здание вертикальной сборки

Это сооружение, предназначенное для окончательной сборки космических кораблей и ракет-носителей перед стартом со стартового комплекса LC-39. Расположено на мысе Канаверал (штат Флорида) в Космическом центре им Кеннеди НАСА (рис. 9.38).

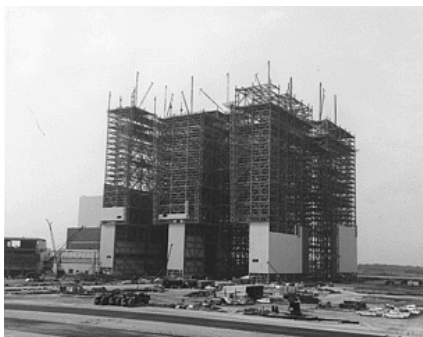


Рис. 9.38. Здание вертикальной сборки

Оно является самым высоким производственным зданием, высота — 160 метров, длина — 218 метров, ширина — 158 метров, занимае-

мая площадь — 3,25 гектара. Общий объём здания — 3664883 м³, что позволяет ему, кроме всего прочего, занимать 4-е место в списке самых объёмных зданий мира.

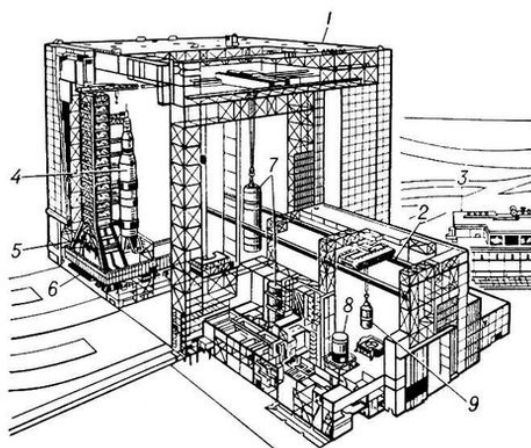


Рис. 9.38. Схема здания: 1 — высотная часть; 2 — малый пролёт; 3 — здание командного пункта; 4 — собранная ракета-носитель; 5 — кабель-заправочная башня; 6 — гусеничный транспортёр; 7 — вторые ступени ракеты; 8 — третья ступень ракеты (в процессе проверки); 9 — космический объект.

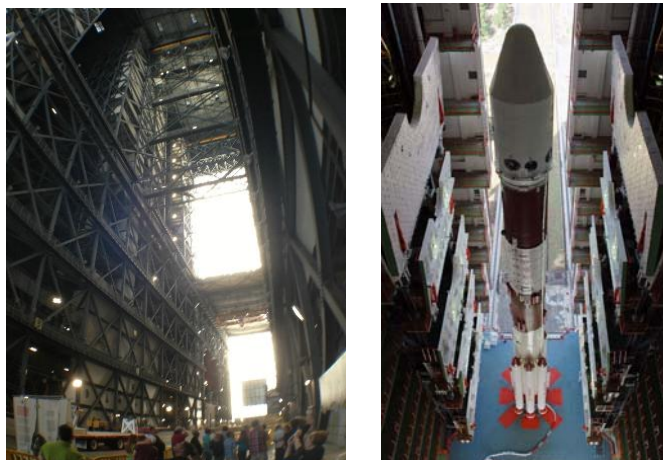


Рис. 9.40. Интерьер здания и вид с открытыми воротами

Часто утверждается, что всё здание является одним огромным этажом, что наглядно демонстрирует схема здания (рис. 9.39). В нём

смонтированы самые высокие в мире ворота (рис. 9.40), на открытие которых уходит 45 минут.

При строительстве здания были израсходованы 89421 тонн стальных конструкций и 49696 м³ бетона. Здание построено в 1963—1965 годах и служило сначала для сборки ракет-носителей «Сатурн V» с кораблями «Аполлон», а позже — космических кораблей многоразового использования (Space Shuttle).

ПОРТРЕТНАЯ ГАЛЕРЕЯ

Thomas Telford (1757 – 1834) — выдающийся английский инженер и исследователь. Его исследования по теории конструктивной формы и прочности сооружений он сочетал с работой по практическому проектированию. Строитель первого чугунного моста, но инженерным творением, принесшим ему мировую славу был созданный Телфордом мост через Менай. Он был первым президентом общества гражданских инженеров (Institution of Civil Engineers)



Marc Seguin (1786 – 1875) — французский инженер, изобретатель висячего моста с проволочным кабелем и автор проекта первого такого моста



William Fairbairn (1789 – 1874) — механик и инженер, провел обширное экспериментальное исследование прочности пластин из ковкого железа и заклепочных соединений таких пластин. Он также провел экспериментальное исследование сплющивания труб, подвергнутых наружному давлению. В 1864 г. провел и экспериментально исследовал выносливость клепаных двутавровых балок



Iton Hodgkinson (1789 – 1874) — английский ученый и механик, исследовал изгиб призматических стержней из материала, различно сопротивляющегося растяжению и сжатию, в предположении, что диаграммы растяжения и сжатия могут быть аппроксимированы степенными функциями. По-видимому, он впервые установил, что для балки из материала, одинаково сопротивляющегося растяжению и сжатию, рациональной формой поперечного сечения является двутавр, в случае материала, различно сопротивляющегося растяжению и сжатию — тавр.



Charles Blacker Vignoles (1793 – 1875) — главный инженер, проектировщик, внешний консультант на железнодорожном строительстве в Великобритании, Ирландии, Испании. В Киеве по проекту Виньоля был построен Николаевский цепной мост. Автор современного железнодорожного рельса с плоской подошвой



Joseph Paxton (1803 – 1865) — в 1837 г. он построил Великую оранжерею, бывшую на тот момент самым большим стеклянным зданием в мире, автор проекта и строитель Хрустального дворца



Robert Stephenson (1803 – 1859) — английский инженер (паровозо- и мостостроение). Сын знаменитого паровозостроителя Джорджа Стефенсона (многие из достижений, обычно приписываемых его отцу, на самом деле фактически были созданы ими совместно). Стефенсон построил известный висячий мост в Ньюкастле ("High Level Bridge") и изобрел так называемые, трубчатые мосты, известнейший из таких построенных им мостов — "Мост Британии" через пролив Меней



John Roebling (1806 – 1869) — американский инженер, выходец из Германии, пионер в области проектирования стальных висячих мостов, изобретатель способа изготовления кабеля из проволок непосредственно на монтаже. Его самая известная работа - Бруклинский Мост, Нью-Йорк, законченный под руководством его старшего сына Вашингтона Августа Роблинга в 1883 году



Isambard Kingdom Brunel (1806 – 1859) — выдающийся британский инженер, легендарная фигура в истории Промышленной революции. Проектировал и руководил постройкой 5 висячих мостов, 125 железнодорожных мостов, в том числе Клифтонский мост у г. Бристоль (Великобритания)



Станислав Валерианович Керbedз (1810 – 1899) — российский инженер и учёный, автор проекта и директор работ по строительству первого в России большого моста через Большую Неву (ныне мост Лейтенанта Шмидта) и моста через Вислу в Варшаве. Он сыграл видную роль в развитии теории и практики мостостроения в России; провёл фундаментальные исследования заклёпочных соединений, разработал нормы допускаемых напряжений для железа.



John Fowler (1817 – 1898) — английский инженер-строитель, был создателем первой подземной железной дороги в мире (Лондон). В 1880-ых, он был главным инженером Forth_Railway_Bridge, который открылся в 1890 г. Он был самым молодым президентом Общества инженеров-строителей



Дмитрий Иванович Журавский (1821 – 1891) — русский инженер и исследователь, создатель расчёта раскосных ферм и теории скалывания при изгибе. Проектировщик и строитель мостов, в том числе Веребьинского моста с неразрезной фермой о девяти пролётах. Вскоре после окончания сооружения Веребьинского моста ему было поручено переустройство шпица колокольни Петропавловской крепости, когда в 1874 г. было решено заменить деревянную конструкцию металлической. Эта работа Д. И. Журавским была с успехом выполнена



Johann Wilhelm Schwedler (1823 – 1879) — немецкий инженер и исследователь, участник и руководитель проектирования многих ответственных сооружений. Создатель купола Шведлера и фермы Шведлера, которые имели большое влияние на развитие металлических конструкций в последней трети XIX столетия



Gustave Eiffel (1832 – 1923) — французский инженер, специалист по проектированию стальных конструкций. Завоевал небывалую популярность после постройки металлической башни, названной в его честь. До строительства Эйфелевой башни был известен своими стальными конструкциями для мостов Понте де Дона Мария Пиа в Португалии, железнодорожного моста длиной 500 метров в Бордо, вокзалов в городе Будапешт. Он завершил также виадук де Гараби, принимал участие в строительстве железного каркаса для нью-йоркской статуи Свободы



Washington Lilian Roebling (1837 – 1926) — американский инженер-строитель, наиболее известна его работа над Бруклинским Мостом, который был первоначально разработан его отцом Джоном Роблингом



Theodore Cooper (1839 – 1919) — американский инженер-строитель. Он разработал первые нормы проектирования стальных мостов (1884), но наиболее известен как автор первоначального проекта Квебекского моста, который потерпел аварию в 1907 году



Benjamin Baker (1840 – 1907) — английский инженер-строитель, который работал вместе с John Fowler над развитием подземных железных дорог в Лондоне, но самой известной его работой является Forth_Railway_Bridge. Он возглавлял общественное расследование аварии Тэйского моста и участвовал в проектировании и строительстве первой Асуанской плотины



Николай Аполлонович Белелюбский (1845 – 1922) — русский механик и инженер, в течение более чем пятидесяти лет фактически руководил мостостроением России. По его проектам и под его руководством было построено более пятидесяти мостов. По его предложению в пролетных конструкциях мостов стали использовать литое железо. Под руководством Белелюбского был разработан «Нормальный русский метрический сортament». В 1912 году был избран президентом Международного общества испытания материалов



Gustav Lindenthal (1850 – 1935) — американский инженер, выходец из Моравии, автор проектов Sciotoville Bridge через р. Огайо (первый в мире неразрезной решетчатый мост с пролетами по 236,2 м) и арочного Hell Gate Bridge в Нью-Йорке



Владимир Григорьевич Шухов (1853 – 1939) — русский и советский инженер, изобретатель и учёный, автор проектов и технический руководитель строительства разнообразных стальных конструкций. Он первым в мире применил для строительства зданий и башен стальные сетчатые оболочки, создав первые в мире гиперболоидные конструкции



Josef Melan (1853 – 1941) — австрийский инженер и исследователь, выдающийся авторитет в области теории и практики строительства мостов, один из создателей теории конструктивной формы. Его книги по мостам обладали международной популярностью и стали практически нормами де факто их проектирования. Бесprecedентно его влияние на теорию и практику больших мостов в США в течение первых двух десятилетий XX-го столетия



Ralph Modjeski (1861 – 1940) — американский инженер, выходец из Польши, автор проектов многих крупнейших мостов США, строитель второго варианта Квебекского моста (после аварии 1909 года)



Albert Kahn (1869 – 1942) — американский инженер, разработчик множества проектов производственных зданий для металлургии и машиностроения, создатель современной промышленной технологии проектирования



Евгений Оскарович Патон (1870 – 1953) — русский и советский учёный в области сварки и мостостроения, руководитель Института сварки, который ныне носит его имя. Он известен работами по вопросам статике сооружений и конструирования железных мостов. В частности, он сформулировал принципы расчёта и построения клёпаных мостов. Руководил проектированием свыше 50-ти мостов



Joseph Strauss (1870 – 1938) — инженер, автор проекта и строитель знаменитого моста Золотые ворота в Сан-Франциско



Николай Stanisлавович Стрелецкий (1885 – 1967) — глава советской школы металлических конструкций, строитель многих мостов, автор работ по теории конструктивных форм, один из авторов теории расчета по предельным состояниям



Franz Dischinger (1887 – 1953) — немецкий инженер и ученый, специалист по железобетонным и стальным конструкциям, автор первого из современных вантовых мостов



William Frederick Lamb, (1893 –1952) — американский архитектор и инженер, автор проекта и руководитель проектирования Эмпайр Стейт Билдинг.



Richard Buckminster Fuller (1895 – 1983) — американский архитектор, дизайнер, инженер и изобретатель. Он сделал большое число изобретений, в основном в сфере дизайна и архитектуры, наиболее известным из которых является лёгкий и прочный «геодезический купол»



Max Mengerinhausen (1903 – 1088) — немецкий инженер и изобретатель, создатель системы МЕРО



Николай Прокофьевич Мельников (1908 – 1982) — крупный организатор в области металлостроительства и применения металлических конструкций в атомной промышленности и космической технике



Александр Георгиевич Соколов (1909 – 1998) — инженер и исследователь, крупный специалист в области высотных и других инженерных сооружений, автор многочисленных проектов радиомачт, башен, резервуаров газгольдеров, воздухонагревателей и др.



Frei Otto (род. 1926) — немецкий инженер и исследователь, получивший всемирное признание как создатель тентовых и мембранных конструкций, которые он применял в проектах Павильона ФРГ на Всемирной выставке в Монреале в 1967, спортивных сооружений на Олимпийских играх в Мюнхене в 1972 году и др.



ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Артоболевский И.И., Благодоров А.А. и др. Очерки истории техники в России (1861-1917).—М.: Наука, 1975.— 397 с.
2. Беленя Е. И., Балдин В. А., Ведеников Г. С. и др. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для вузов.— Под общ. ред. Е. И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1986.— 560 с.
3. Бернштейн С.А. Очерки по истории строительной механики.— М.: Госстройиздат, 1957.— 236 с.
4. Вахуркин В.М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок // Бюллетень строительной техники. 1949, №21.— С. 3-8.
5. Гломб Ю. Pontifex maximus. Над пространством и временем.—Gliwice, 1997.— 232 с.
6. Горбунов Б. Н. Сплошные сварные балки и мосты.— М.-Л.: Стройиздат, 1941.
7. Гордеев В.Н., Гринберг М.Л., Кондра М.П. О выборе оптимальных очертаний башни // Строительная механика и расчет сооружений, 1969, №6 — С. 59-61.
8. Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи.— М.: Мир, 1980.— 237 с.
9. Журавский Д.И. О мостах раскосной системы Гау.— Санкт Петербург, 1855.
10. История строительной техники. Под общей ред. В.Ф.Иванова. — М.-Л.: Госстройиздат, 1962.— 560 с.
11. Кондра М.П., Остроумов Б.В. Опыт применения динамических гасителей колебаний при виброзащите башен // Международный симпозиум «Виброзащита в строительстве». Доклады и сообщения.— Л.: Промстройпроект, 1984.
12. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию.— К.: ВАГ Мостобуд, 2003.— 546 с.
13. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И. Металлические конструкции. Учебник под ред. Ю. И. Кудишина. 10-е издание. —М: Академия, 2007.
14. Малишевский И. О чем умолчал академик. 50 лет тому назад отошел в вечность Евгений Патон // Зеркало недели» №30, 09 августа 2003.
15. Маслов В. В. Основы металлических конструкций: Учебное пособие для студентов специальности .— Волгоград: 98 с.
16. Михайлов Б.П. Итоги разработки прокатных профилей для металлических конструкций.— М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1935.

17. Морозов Е.П. Супергиганты антенной техники // Монтажные и специальные работы в строительстве, 2005, № 1.— С. 2-7.
18. Патон Е.О., Горбунов Б.Н. Стальные мосты.— К.: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935.—812 с.
19. Пермяков В.О., Нілов О.О., Шимановський О.В. та ін. Металеві конструкції (підручник) / Під заг. ред. Пермякова В.О. та Шимановського О.В. — Киев: Сталь, 2008.— 809 с.
20. Прцкер А.Я., Аденский В.Л., Фридман М.С. Бескаркасные складчатые конструкции.— К.: Будивэльнык, 1991.— 88 с.
21. Савицкий Г.А. Основы проектирования антенных конструкций — М.: Связь., 1973.— 240 с.
22. Сварные строительные конструкции. Справочное издание в 3 томах. — К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 2003.
23. Селезнева Е.Н. О классификации и основах проектирования мачто-башенных сооружений // Металлические конструкции. Сборник трудов МИСИ №43.— М.: Госгортехиздат, 1961.— С. 302-318.
24. Соколов А. Г. Металлические конструкции антенных устройств. — М.: Стройиздат. 1971.— 240 с.
25. Стрелецкий Н.С. Избранные труды.— М.: Стройиздат, 1975.— 424 с.
26. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов.— М.: Гостехтеориздат, 1957.— 536 с.
27. Чесноков А.С, Княжев А.Ф. Сдвигоустойчивые соединения на высокопрочных болтах. М.: Стройиздат, 1974.— 120 с.
28. Шевченко В.Г. Сварщик Виктор Вологдин.— Санкт-Петербург-Владивосток, 2004 [<http://www.proza.ru/2010/12/28/899>]
29. Шумицкий О.И. Исследование и развитие конструктивной формы сварных стальных телевизионных башен большой высоты // Строительные конструкции. Вып. 27.— К.: Будивэльнык, 1976.— С. 1-19.
30. Шухов В.Г. Стропила. Изыскание рациональных типов прямолинейных стропильных ферм и теория арочных ферм.— М.: 1987.
31. Augustyn J. Stefan Bryla: Życie i dzieło .— Warszawa: Fundacja Polskiego Związku Inżynierów Budowlanych "Inżynieria i Budownictwo", 1994.— 107 s.
32. Bergeron L., Maiullari-Pontois M.T Industry, architecture, and engineering: American ingenuity, 1750-1950. -NY: Harry N. Abrams, Inc., 2000. —287 p.
33. Bradley B.H. The Works: the industrial architecture of the United States. /New York, Oxford: Oxford University Press, 1999. —347p.
34. Clark E. The Britanlian and Conwaj tubular bridges (2 volumes).— London: 1850.
35. Cord E, Die technische Entwicklung des Peiner Walzwerks 1872-1950, Dusseldorf: Stahleisen.
36. Dorn H. A note on “Structural antecedents of the I-beam” // Technology and Culture, Vol. 9, No. 3, Jul., 1968.— P. 415-418.Duleau A. Essai théorique et expérimental sur la résistance du fer forgé.— Paris, 1820.
37. Fairbairn W. An Experimental Inquiry into the Strength of Wrought- Iron Plates and Their Riveted Joints as Applied to Ship-building and Vessels Ex-

- posed to Severe Strains // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1850, vol. CXL, Part I. — P.— 677-725.
38. Fairbairn W. *Treatise on Iron Shipbuilding*. — London: Longman. 1865.
 39. Fairbairn W., *An Account of the Construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges with a complete History of their Progress, from the Conception of the Original Idea, to the Conclusion of the Elaborate Experiments which Determined the Exact Form and Mode of Construction ultimately.*— London: John Weale and Longman, Brown, Green & Longmans, Paternoster Row. 1849.
 40. Faustus Verantius. *Machinae Novae Fausti Verantii*. — Venice , 1617.
 41. Fedorov S. Matthew Clark and the origins of Russian structural engineering 1810-40s: an introductory biography // *Construction History, Journal of the Construction History Society*, 8, 1992.— S. 69-88.
 42. Gasparini D.A., Provost C. Early Nineteenth Century Developments in Truss Design in Britain, France and the United States // *Construction History*, Vol. 5, 1989 — P. 21-33.
 43. Hodgkinson E. Theoretical and experimental researches to ascertain the strength and best forms of iron beams // *Proceeding of Manchester literary and philosophical society*, 1831.— P. 407-544.
 44. Jewett R. Structural Antecedents of the I-Beam, 1800-1850 // *Technology and Culture*, 1967, Vol. 8, No. 3 .— P. 346-362.
 45. Klaseen L. *Handbuch der Hochbaukonstruktionen in Eisen*. Leipzig. LAB Rep. 226: 1876
 46. Mende M. The Crucial Impact of Improvements in Both Steelmaking and Rolling on 19th and Early 20th-Century Building Construction // *Proceedings of the Second International Congress on Construction History [Volume 2] (pp. 2159-2170)*
 47. Mislin M. Iron constructions for factory buildings in Berlin in the nineteenth and early twentieth century // *Proceedings of the First International Congress on Construction History.*— Madrid: 2003.— P.1439-1451.
 48. Pevsner, N., Sir. *A history of building types*. - London: Thames and Hudson, 1976. —352 p.
 49. Schwedler J.W. *Eiserne Dachconstructionen uber Retortenhausern der Gas-Anstalten zu Berlin* // *Zeitschrift fur Bauwesen*, 1869, vol. 19, col. 65–70.
 50. Schwedler J.W. *Resultate uber die Konstruktion der eisernen Brucken* // *Zeitschrift fur Bauwesen*, 1865, vol. 15/— col. 331–340.
 51. Tredgold T. *Practical Essay on the Strength of Cast Iron and Other Metals* (4th ed., with notes by Eaton Hodgkinson).— London, 1842.
 52. Zores Ch. F. *Recueil des Fers Speciaux des experiences faites sur leurs resistance et de leurs diverses applications dans les constructions* .— Paris, 1853.
 53. Polonceau C. *Notice sur an nouveau système de charpente en bots et en fer* // *Revue générale de l'architecture et des travaux publics*, 1840, №1.— P. 27-32.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Очерк первый. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ	5
Развитие сталеплавильного производства	6
Применение железа и его сплавов в строительстве	18
Способы соединения элементов	21
Очерк второй. КОНСТРУКТИВНАЯ ФОРМА НОМЕР ОДИН	29
Эмпирики	30
Исследователи	36
Усовершенствования	39
Дальнейшие шаги	41
Очерк третий. КОЕ-ЧТО О МОСТАХ...	45
Первые чугунные мосты	45
Первые висячие мосты	49
Мосты из сварочного железа	51
История мостовой фермы	55
Прыжки в длину — погоня за рекордами	62
Первый цельносварной мост	74
Разводные мосты	78
Уроки аварий	81
Очерк четвертый. ... И О КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ	89
Конструктивная форма номер два	89
Большие пролеты	95
Становление схемы производственного здания	100
Какими были первые небоскребы	114
Легкие металлоконструкции	122
Очерк пятый. РАЗВИТИЕ АНТЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ	129
Использование аэродинамических свойств трубчатых элементов	129
Использование рей для подкрепления оттяжек	132
Объединение мачт в единую систему	134
Сети для антенно-мачтовых систем сверхдлинноволновых радиостанций	137
Обеспечение требуемой жесткости	138
Несимметричная компоновка башни	139

Монтаж способом подрачивания	142
Борьба с вибрациями	143
Еще немного о мачтах и башнях	144
Очерк шестой. ДРУГИЕ ВЫСОТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ	151
Башни ветротурбин	152
Вытяжные трубы	167
Опоры линий электропередачи (ЛЭП)	172
Очерк седьмой. КОНСТРУКЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ	183
Радиотелескопы с поворотным рефлектором	185
Неподвижные антенные системы	197
Механические конструкции космических антенн	201
Очерк восьмой. КОНСТРУКЦИИ ЕМКостей	205
Баки для воды	205
Силосы для хранения зерна	210
Резервуары для нефти и нефтепродуктов	212
Газгольдеры	219
Уроки аварий	225
Очерк седьмой. САМЫЕ-САМЫЕ	229
Хрустальный дворец	229
Эйфелева башня	233
Гиперболоид инженера Шухова	239
Эмпайр Стейт Билдинг	243
Мост Золотые ворота	245
Олимпийский стадион в Мюнхене	251
Купол Фуллера	254
Самое большое производственное здание	259
Портретная галерея	263
Источники информации	270