

Б.А.КИРИКОВ

# СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ДРЕВНИХ СООРУЖЕНИЙ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СЕЙСМОЛОГИИ  
И СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

Б.А.КИРИКОВ

**СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ  
ДРЕВНИХ  
СООРУЖЕНИЙ**

Ответственный редактор  
доктор технических наук  
Я.М. АЙЗЕНБЕРГ



МОСКВА "НАУКА"  
1992

Кириков Б.А. Сейсмостойкость древних сооружений. — М.: Наука, 1992. 136 с. ISBN 5-02-002256-X

В предлагаемой любознательному читателю книге рассказывается о тех многочисленных и оригинальных антисейсмических мероприятиях, которые применяли древние строители в своих сооружениях. Раскрываются секреты старых мастеров по обеспечению сейсмостойкости древних сооружений, прослеживается путь развития идей сейсмостойкости от глубокой древности до наших дней. Делается попытка обобщить опыт сейсмостойкого строительства, накопленный за несколько тысячелетий, и передать этот опыт современному человеку.

Рецензенты *В.А. Ивович, Л.Р. Станциер*

The book tells in a popular form about the phenomenon of earthquake resistance of some ancient buildings and structures and aseismic measures employed by the ancient builders. The author begins from the old civilizations of India, Mesopotamia and Crete. Then he analyses in detail, from the standpoint of earthquake resistance, many buildings and structures of the Ancient Greece, Rome and Byzantium. After he turns to Caucasus in order to investigate the architectural monuments of Armenia and Azerbaijan, he deals with the brickwork structures of the Central Asia. Attention is also given to remarkable wooden pagodas and other structures in China and Japan.

The proposed book, though being a popular science book, analyses numerous aseismic structures of the antiquity from the most modern standpoints of the theory of earthquake resistance.

Научное издание

Кириков Борис Алексеевич

### СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ДРЕВНИХ СООРУЖЕНИЙ

*Утверждено к печати Межведомственным советом по сейсмологии  
и сейсмостойкому строительству*

Редактор *Г.В. Киреева*. Художник *А.Г. Кобрин*. Художественный редактор *И.Ю. Нестерова*  
Технический редактор *Г.П. Каренина*. Корректор *Н.Л. Голубцова*

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 49074

Подписано к печати 06.12.91

Формат 60 X 90 1/16. Бумага офсетная № 1. Гарнитура Пресс-Роман

Печать офсетная. Усл.печ.л. 8,5. Усл.кр.-отт. 8,8. Уч.-издл. 9,5

Тираж 360 экз. Тип. зак. 1722

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"  
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"  
199034, Санкт-Петербург В-34, 9-я линия, 12

К 1803020000-375 323-92, 1 полугодие  
042(02)-92

© Издательство "Наука", 1992

© Б.Д. Кириков, 1992

ISBN 5-02-002256-X

*Посвящается  
профессорам А.С. Башкирову и Н.М. Бачинскому,  
большим труженикам, исследователям  
сейсмостойкости древних сооружений.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Не помню, какую ученую знаменитость спросили, как совершаются открытия. Она ответила, что все очень просто. Есть вещи, о которых все знают, что их сделать нельзя, но находится всегда невежда, который этого не знает, он то и делает это открытие. Я берусь выполнить то, о чем все знают, что этого сделать нельзя. Собираюсь в предлагаемой вам книге обобщить тысячелетний опыт сейсмостойкого строительства.

Совершенно ясно, что рассказать о всех сейсмостойких конструкциях от древности до современности невозможно не только из-за ограниченного объема книги. Но есть другой путь — достаточно полно описать мир сейсмостойких конструкций в историческом аспекте. Для этого надо рассмотреть идеи и принципы разработки этих многообразных конструкций, большинство из которых было открыто в глубокой древности и применяется до сих пор, и проиллюстрировать это на примерах. Меняются конструкции и строительные материалы, меняются способы производства работ, меняются люди, но законы природы остаются, поэтому остаются и принципы конструирования сейсмостойких сооружений. В этой книге я попытался обобщить опыт нескольких тысячелетий в области сейсмостойкого строительства.

Думаю, что в связи с применением во многих странах мира сейсмостойкого строительства потребность осмыслить его многовековой опыт имеется давно, но мне известны пока только две такие попытки: 1) книга Н.М. Бачинского, посвященная древним памятникам Средней Азии, 2) четырехтомник А.С. Башкирова, в котором рассматривается антисейсмизм Древнего Востока, Древней Греции, Рима и Причерноморских греческих колоний. Вышли эти книги более сорока лет тому назад очень ограниченным тиражом. Оба автора были археологами. Данная же книга пишется с позиций строителя.

Думаю, что выбранная тема интересна. Одним, просто любопытным, хочется знать, как создаются эти загадочные сейсмостойкие здания сегодня и как это делалось в глубокой древности. Другим, живущим в сейсмоопасных районах, это просто необходимо знать.

Предлагаемая книга не является исторической в обычном понимании, поэтому я не буду строго придерживаться рамок места события и времени.

Выражаю благодарность замечательным людям Любе Чухонцевой и Олегу Марковичу, которые сделали иллюстрации к этой книге.

*Б.А. Кириков*

## ЧТО ТАКОЕ СЕЙСМОСТОЙКОЕ ЗДАНИЕ?

### НЕМНОГО О ТОМ, О ЧЕМ ЗДЕСЬ НЕ БУДЕТ РАССКАЗАНО

Данная книга посвящена чисто строительным вопросам, поэтому я не буду описывать, как возникают землетрясения, как распространяются сейсмические волны, как предсказать землетрясения. Но для того чтобы были понятны дальнейшие рассуждения, представим, как движется грунт под сооружением во время землетрясения.

Движение это очень сложное. Для его математического описания, близкого к истине, может пригодиться только теория случайных функций. По сути дела, во время землетрясения под зданием пробегает одновременно целый набор сейсмических волн, каждая из которых имеет свою длину, свой период колебания, свою амплитуду и свою скорость распространения. В результате все точки грунта под фундаментом сооружения двигаются, хоть в некоторых случаях и мало отличаясь, но по-разному. При следующем землетрясении эта картина не повторится. Она может быть совершенно иной. Ее можно предсказать только в самых общих чертах. Вот в таких условиях так называемой неполноты информации о землетрясениях строили древние зодчие и строят современные строители. Вот поэтому, что в прошлом, что в настоящем, необходимо обязательно обращаться к опыту сейсмостойкого строительства прошлых лет, чтобы осмыслить его и не повторять ошибки прошлого в будущем. Движение грунта под зданием носит чрезвычайно нерегулярный характер, оно зависит от свойств грунта, от свойств самого здания, от формы и глубины заложения фундамента этого здания.

Очень важно на каких грунтах стоит сейсмостойкое здание, так как свойства грунта влияют на характеристики землетрясения и на поведение самого сооружения. Во время землетрясения идет процесс взаимодействия между грунтом и зданием, при котором эффект землетрясения может увеличиваться или уменьшаться. Очевидно, что древние строители знали об этом и уделяли большое внимание подготовке грунтового основания под сооружения. Подробно об этом будет еще рассказано.

Чтобы не было лишнего недоумения, сразу оговорюсь, что устаревшее понятие "балл землетрясения" здесь не будет употребляться. Дело в том, что оно было введено для характеристики интенсивности землетрясения, и определялся балл по поведению несейсмостойких сооружений. Как же теперь определять балл землетрясения, если в сейсмически опасных районах все здания должны быть сейсмостойкими? В настоящее время



Рис. 1. Змеиная модель сейсмического воздействия

развита сеть сейсмометрических станций, которые позволяют характеризовать землетрясение его реальными параметрами, определяемыми по записям. Это амплитуды, периоды колебания, скорость распространения и т.д.

Теперь можно немного пофантазировать и представить картину движения грунта под сооружением во время землетрясения. По-моему, лучше всего здесь для наглядности подойдет образ гигантского змея,двигающегося под зданием, как показано на рис. 1. Здесь видны и скорость распространения бегущей волны, и ее амплитуда, и преобладающие периоды. Для полноты картины надо представить, что таких змей много.

Предложенная многозмеиная модель землетрясения позволяет легко представить тот упорядоченный хаос, который царит под сооружением во время землетрясения. Отдельные точки фундамента сооружения смещаются в произвольных направлениях, казалось бы, независимо. При достаточно сильном землетрясении фундамент здания то разрывается, то сжимается, то перекручивается, то изгибается, а то и все сразу. Сразу возникает вопрос: а можно ли, имея приблизительную информацию о явлении, создавать все-таки сейсмостойкие здания? Отвечаю. Можно, это подтверждено историей сейсмостойкого строительства.

Итак, создание сейсмостойких зданий – задача со многими неизвестными (от свойств сейсмического воздействия до характеристик здания) и одним известным – человеческая жизнь, которая должна быть в безопасности при землетрясении.

#### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СЕЙСМОСТОЙКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Прежде чем отправиться по всем континентам и во все времена в поисках сейсмостойких конструктивных решений, давайте выясним, что такое сейсмостойкое здание? Если это трактовать узко, то сейсмостойким считается такое здание, которое обеспечивает сохранность жизни людей и материальных ценностей при землетрясении. Это определение сейсмостойкого здания с гуманистических позиций. С экономической точки зрения это понятие можно сформулировать так. В сейсмостойком здании расходы на восстановительные работы после землетрясения не должны превышать определенной доли от стоимости здания. Если каким-то образом предотвратить человеческие жертвы, например с помощью предска-

здания землетрясения и соответствующей эвакуации населения, то с этой позиции выгоднее всего для некоторых городов вообще не проводить какие-либо дорогостоящие антисейсмические мероприятия, а просто после каждого сильного землетрясения раз в сто или двести лет город отстраивать заново. Землетрясение — явление все-таки достаточно редкое, а расходы на антисейсмические мероприятия большие.

Как сформулировать более общее определение сейсмостойкого здания, я не знаю, но думаю, что это можно и нужно сделать. Может быть, здесь помогла бы теория вероятностей. Например, коротко и ясно так: "Сейсмостойким считается здание, вероятность разрушения которого от землетрясения с ожидаемой интенсивностью не должна превышать определенной величины за весь срок эксплуатации". Во всяком случае в интуитивном представлении о сейсмостойком здании одновременно мыслятся и особенности конструкции, и безопасность для жизни людей, и допускаемый уровень разрушения, и экономические показатели.

Решусь сформулировать основные фундаментальные принципы конструирования сейсмостойких зданий, лежащие в основе не только древних, но и современных антисейсмических конструктивных решений.

1. Принцип симметрии: веса и жесткости в конструкции должны быть распределены равномерно и симметрично относительно плоскостей симметрии, проходящих через центр тяжести сооружения.

2. Принцип гармонии: необходимо выдерживать пропорциональность в размерах здания, при этом длина или высота его не должны быть чрезвычайно большими.

3. Принцип антитяжести: необходимо делать сооружение как можно более легким, с центром тяжести, расположенным как можно ниже.

4. Принцип эластичности: материалы в конструкции желательно применять прочные, легкие, обладающие упругими свойствами, конструкции из них должны иметь однородные свойства.

5. Принцип замкнутого контура: несущие элементы конструкции должны быть связаны между собой, образуя замкнутые контуры как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном.

6. Принцип фундаментальности: фундаменты сейсмостойких конструкций должны быть прочными, достаточно глубоко заложенными, желательно на податливых прослойках или специальных субструкциях, заменяющих плохие грунты, для обеспечения однородности и прочности грунтового основания.

7. Принцип сейсмоизоляции: применять устройства, снижающие интенсивность колебательных процессов, передаваемых от грунта на здание.

Хочу Вас предупредить, что к этим принципам надо относиться так же, как и к любым другим принципам, их вовсе не обязательно полностью соблюдать. Разумеется, можно строить очень высокие или несимметричные сооружения, но в этом случае надо принять какие-то дополнительные меры, чтобы обеспечить их прочность при землетрясении.

Подразумевается, что качество должно быть отличное.

Эти принципы призваны обеспечить работу такой конструкции, в которой нигде не было бы перенапряжения. Если при землетрясении в какой-то части здания происходит резкая концентрация напряжений, то в этом

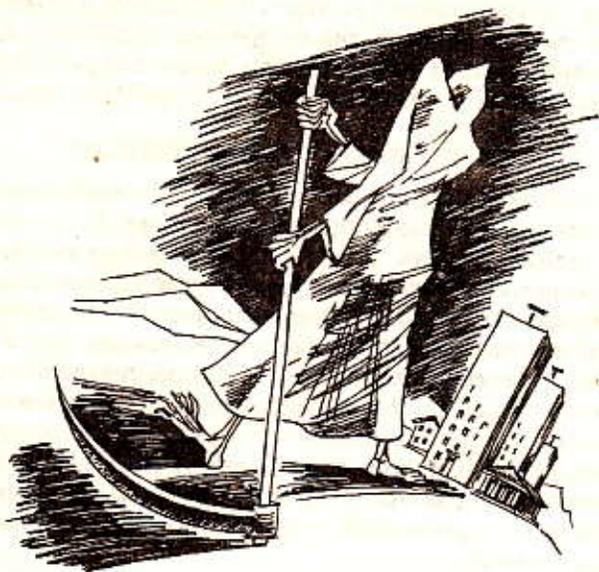


Рис. 2. Проект плаката для сейсмоопасного района

месте скорее всего произойдет разрушение, а дальше лавинообразное обрушение всего сооружения. Задача состоит в том, чтобы избежать перегрузок отдельных элементов здания при землетрясении.

В предложенных семи принципах я попытался обобщить весь многовековой опыт сейсмостойкого строительства. К ним, конечно, можно добавить что-то еще, постараюсь это сделать по мере раскрытия темы. Как увидим дальше, все указанные принципы мы найдем в сейсмостойких древних сооружениях.

Итак, я приглашаю Вас искать в древних сооружениях конструктивное воплощение сформулированных принципов сейсмостойкого строительства, чтобы выяснить, какие антисейсмические мероприятия применялись в них. Разумеется, не дошло до нас чертежей, за редким исключением, и моделей древних, а особенно древнейших сооружений, часто не осталось и самих этих сооружений, из них были сделаны каменоломни, сохранились от многих только отрывочные описания, иногда развалины, но есть и такие, которые стоят и по сей день, демонстрируя нам свое строительное совершенство.

Мне кажется, что единственный путь – взглянуть на древние сооружения с точки зрения современного представления о сейсмостойкости зданий и дать им анализ с современных позиций. Конечно, неизбежны ошибки в наших поисках. В одних случаях мы будем приписывать древним авторам то, о чем они и не думали. В других случаях, наоборот, не заметим каких-то конструктивных приемов, которые применяли древние строители для повышения сейсмостойкости своих сооружений. Но другого пути для обобщения опыта многих веков сейсмостойкого строитель-

ства с пользой для настоящего я не вижу. Путешествуя в поисках признаков антисейсмических мероприятий по древним сооружениям, не будем забывать, что вырвавшаяся на поверхность земли стихия не раз собирала богатый урожай в виде человеческих жизней и страданий (рис. 2).

### КАК ЗДАНИЯ ДЕЛАЮТСЯ СЕЙСМОСТОЙКИМИ?

Как разрушаются здания при землетрясении? Условно можно назвать два способа разрушения зданий при землетрясении. 1. При слабом фундаменте на слабых грунтах могут произойти неравномерные осадки сооружения во время землетрясения, иногда уже до этого здание ослаблено неравномерными осадками по другим причинам, в результате всех этих просадок появляются перенапряжения отдельных частей или всего здания и соответствующие разрушения. 2. Здание сильно раскачивается, попадая почти в резонанс. Это происходит, когда собственный период колебания здания близок преобладающему периоду колебания грунта во время землетрясения. При этом способе разрушения здания в его несущих конструкциях напряжение от больших деформаций может превзойти предел прочности материала и это также вызовет разрушение здания. Задача теперь почти ясна.

Чтобы создать сейсмостойкое здание, необходимо предохранить его от неравномерных осадок фундамента, которые вызывают перенапряжение несущих конструкций здания, и от почти резонансных явлений в нем.

Я думаю, что точка зрения древних строителей на сейсмостойкое здание значительно отличалась от современной. Современный строитель может задать вопрос: "Как из этого несейсмостойкого здания сделать сейсмостойкое? Что в этом здании достаточно усилить?" Наверное для древнего строителя такой вопрос невозможен. В его представлении, как можно судить по древним памятникам архитектуры, сейсмостойкое здание принципиально отличается от обычного, в нем все (от соответствующей обработки грунта под фундаментом здания до верхушки купола) должно быть пронизано идеей обеспечения сейсмостойкости. Кажется, что над каждым камнем в кладке думали, как его лучше уложить в зависимости от формы и структуры и закрепить так, чтобы его не выбили сейсмические удары. Раствор в каждом шве должен был не только обеспечить сцепление между камнями, но и предохранить каменную кладку от проникновения внутрь воды, которая будет постепенно разрушать ее. Получается, что гидроизоляция каменной кладки тоже является признаком сейсмостойкого строительства. Мощение, которое делается вокруг здания для предохранения от попадания под него воды и замачивания грунтов под фундаментом, также можно рассматривать как признак сейсмостойкого строительства. Иногда эти, казалось бы, второстепенные детали играют основную роль.

Дальше разговор пойдет о конструктивных антисейсмических мероприятиях, при этом я буду стараться подчеркнуть поразительную продуманность строительных приемов. Многие из них не только обеспечивали сейсмостойкость сооружений, но и позволяли решать другие строительные проблемы. Например, песчаная подушка под фундаментом может

служить для смягчения ударов от землетрясения и в то же время это дренаж для отвода воды из-под сооружения.

Как же создаются сейсмостойкие здания? При разработке проекта сейсмостойкого здания могут быть использованы три принципиально отличных подхода.

Первый подход, самый распространенный, состоит в том, чтобы создавать конструкции повышенной прочности, способные без значительных повреждений пережить землетрясения, ожидаемые в данном районе. При этом здание необходимо усиливать и соответственно удорожать так, чтобы не превзойти экономически обоснованные пределы. Идеальным воплощением данного подхода к созданию сейсмостойких конструкций было бы здание ванька-встанька, этакий крепыш, который спокойно без сильных разрушений мог бы плавать в сейсмических волнах, может быть и сильно раскачиваясь.

Второй подход основан на следующем. Известно, что чем крепче и жестче здание связано с колеблющимся грунтом, тем выше возникающие сейсмические нагрузки, так как лучше передаются колебания от грунта к зданию. А что если снизить эту нагрузку за счет ослабления связи между грунтом и сооружением? Для этой цели служат различные элементы сейсмозащиты: песчаные прослойки, глиняные подушки, камышовые пояса, скользящие пояса из металлических пластин, резиновые прокладки, шары, эллипсоиды, воздушные подушки, пружины. Эти способы существовали в глубокой древности и активно развиваются во многих странах сегодня, так как они позволяют создавать дешевые и надежные сейсмостойкие конструкции. Правильно, наверное, это направление назвать системами парсивной сейсмозащиты.

Третий подход основан на использовании систем активной сейсмозащиты. Здания оснащаются устройствами, которые меняют его динамические свойства и выводят из состояния резонанса. Это самый современный способ создания сейсмостойких зданий, так как в этом случае в здании устраиваются различные силовые приводы, управляемые вычислительными машинами, обрабатывающими на месте информацию от происходящего землетрясения. По сути дела, это здания-роботы.

В то же время это самый древний способ защиты зданий от землетрясений. Дело в том, что любое здание способно при повреждениях во время землетрясения менять свою жесткость, перестраивая как бы свою структуру и соответственно изменяя собственный период колебания. Но в обычных зданиях эти перемены незарегулированы, их собственный период может приближаться к периоду колебания грунта во время землетрясения, тогда возникнет резонанс и возможна катастрофа, и может уходить от периода воздействия, тогда сейсмические нагрузки упадут. В современных зданиях-автоматах система активной сейсмозащиты работает только так, чтобы выводить здание из резонанса.

О том как здание без всякой роботизации способно перестраивать свою структуру, чтобы противостоять сейсмическому воздействию, можно показать на таком примере. Вспомним Ашхабадское землетрясение 1948 г. [1]. По ул. Свободы была расположена мечеть, построенная в

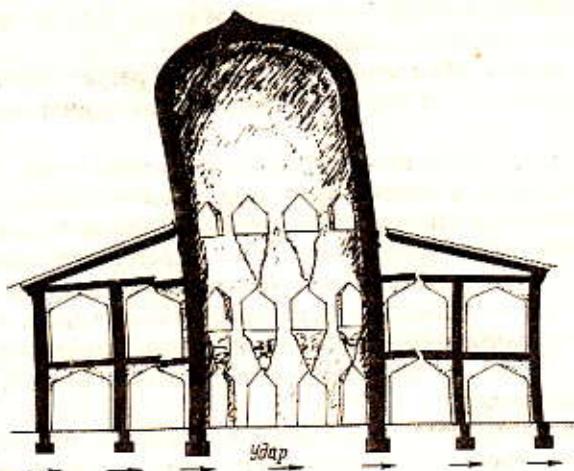


Рис. 3. В результате повреждений здание из жесткого стало гибким

1911 г. из обожженного кирпича на прочном известковом растворе в лучших традициях среднеазиатского зодчества. Эта мечеть состояла из центрального 9-гранного барабана (рис. 3) высотой от основания до вершины купола 33 м и еще двух значительно более низких концентрически расположенных барабанов с арочными перекрытиями, которые составляли пристройку к центральной части. Вся эта конструкция в сборе была, конечно, очень жесткой, т.е. собственный период колебания был небольшим; по-видимому, таким же достаточно малым был и преобладающий период колебаний грунта от близкого землетрясения, поэтому конструкция мечети при землетрясении работала в резонансном режиме, ей грозило разрушение. Объединение центральной и пристроечной частей в единое целое придавало всей конструкции чрезвычайную жесткость. Уменьшение общей жесткости сооружения началось с того, что разрушились связи между центром и пристройкой. Далее каждая часть боролась за существование самостоятельно, в зависимости от своих особенностей. У боковой пристройки срезались опоры, передача энергии колебания от грунта на пристройку снизилась, так как связь между ними теперь осуществлялась только трением. Это и есть прототип скользящих поясов, о которых мы еще будем говорить. Идею такой сейсмозащиты подсказывает сама природа.

Центральная часть повела себя иначе. У нее опоры были слишком прочные, их трудно было срезать. Здесь слабым местом оказались стены над первым и вторым ярусами оконных проемов. При их разрушении образовались трещины под углом  $45^\circ$  к горизонту. Образовались вертикальные опоры купола, которые могли проскальзывать друг относительно друга при наличии между ними только силы трения. Жесткость центральной части мечети резко уменьшилась за счет исключения связей, роль которых сыграли надоконные арки. Центральная часть уцелела, так как купол теперь опирался не на жесткую, а на гибкую конструкцию,

имевшую большой нерезонансный период собственных колебаний. Такая перестройка конструктивной схемы мечети спасла ей жизнь.

Чтобы окончательно уяснить принципиальную разницу между системами пассивной и активной сейсмозащиты, рассмотрим идеальные примеры воплощения той и другой системы. Если взять и подвесить здание над землей на воздушном шаре, то это будет пассивная система сейсмозащиты. Здание будет постоянно полностью изолировано от движущегося во время землетрясения грунта.

Если же построить стоящее на земле здание-вертолет, которое будет взлетать только по команде от соответствующих приборов, предупреждающих о приближении сейсмической волны, чтобы ее пропустить, то это будет уже активная сейсмозащита.

Разумеется, что во всех трех названных подходах к созданию сейсмостойких конструкций необходимо при их проектировании учитывать сформулированные выше принципы сейсмостойкого строительства. Эти принципы прежде всего относятся к зданиям с повышенной прочностью. Но если даже в здании на сейсмоизоляторах не учесть требования симметрии конструкции, то в нем появятся такие крутящие моменты, что одна часть элементов будет перегружена, а другая недогружена. Перегруженные элементы выйдут из строя, а потом разрушится и вся система сейсмоизоляции. Даже в здании-вертолете необходима симметрия конструкции, не говоря уже о требовании ее облегчения.

В данном разделе очерчен круг вопросов, которые дальше будут рассматриваться. Поставлена задача данной книги, осталось ее решить.

## МУДРОСТЬ ДРЕВНЕЙШИХ ИЗ ДРЕВНИХ

### В ТЕ НЕЗАПАМЯТНЫЕ ВРЕМЕНА

Начнем с самых древнейших сооружений, назначение и время строительства которых трудно определить. Это мегалитические однотипные сооружения, которые распространены от Японии до Франции и Англии. Многие из этих сооружений, стоящие в сейсмически опасных районах, за свою тысячелетнюю историю перенесли множество землетрясений и все же сохранились. Возьмем к примеру (рис. 4) гармонично сложенный двухэтажный дольмен около селения Горикди в Азербайджане [2]. Он сложен из десяти тщательно пригнанных каменных плит примерно одной толщины и почти квадратного очертания в плане. В этом дольмене воплощены практически все принципы сейсмостойкого строительства: жесткости и массы в нем распределены равномерно и симметрично; в узлах опирания имеются податливые шарниры; при превышении определенного уровня смещения плиты упираются друг в друга и образуются включающиеся связи, ограничивающие амплитуду колебания системы. Конструкция сначала работает как податливая, а потом с ростом смещения как жесткая нелинейная. Можно привести много других ученых терминов, о которых строители этого древнейшего сооружения, разумеется, и

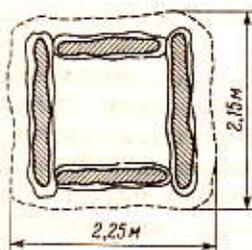
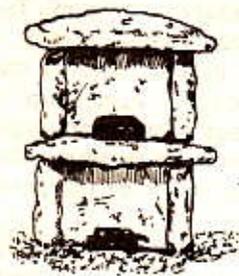


Рис. 4. Двухэтажный сейсмостойкий дольмен

Рис. 5. Древний индийский храм на колесах

не имели понятия. С современной точки зрения это сооружение можно упрекнуть только в излишней, может быть, тяжести, да и то это вопрос спорный. Как увидим дальше, египтяне успешно использовали принцип тяжести вместо цемента.

Вероятно, древние строители оценивали сразу суммарное воздействие, не расчлняя его на ветровое, снеговое, сейсмическое и т.д.

Еще пример. В работе [3] рассматриваются глиняные модели культовых сооружений (даже трехэтажных) на колесах. Есть упоминания о древних индийских храмах на колесах (рис. 5) [4]. Что это? Может быть, строители изобрели сейсмоизолирующее устройство в виде колес? Конечно, нет. Хотя фактически храм на колесах, это, конечно, сейсмостойкое здание. С такой ситуацией мы будем встречаться часто.

Из сказанного ясно, что уже в глубокой древности были заложены основы сейсмостойкого строительства.

#### НА ЧЕМ СТОЯЛИ ВАВИЛОНСКИЕ БАШНИ

Давайте поговорим о строительном искусстве в государствах, существовавших уже в IV тыс. до н.э. Начнем с шумерской цивилизации, возникшей в долине рек Тигра и Евфрата. Потребность бороться с разливами рек и орошать землю обусловила объединение племен в централизованное государство. Соответственно развивалось городское строительство, прорывались каналы и насыпались дамбы, возводились дворцы и храмы [5].

Строительные материалы, применяемые в Двуречье, определялись особенностями природных условий. На безлесой равнине, где не было камня и дерева, господствовали ил и глина, было много битума. Вполне естественно, что здесь стал применяться кирпич. Вначале это был вылепленный руками односторонне-выпуклый сырцовый кирпич, его сменил кирпич, изготовленный в формах, и на грани IV—III тыс. до н.э. широко стал применяться обожженный кирпич. Деревянное было очень мало и ценилось оно очень высоко. Если уезжал хозяин дома, то как величайшую ценность увозил с собой деревянную дверь.

С позиций сейсмостойкости большой интерес представляет конструкция стен. Основной массив кладки стен, облицованных обожженным кирпичом, состоял из кирпича-сырца на растворе из глины и битума. Через каждые 5—13 слоев укладывалась цинковка из тростника, пропитанная битумом, которая предохраняла кладку от влаги и почвенных солей. Известковый раствор стал применяться значительно позднее, в середине I тыс. до н.э. Обожженный кирпич применялся главным образом для облицовки стен [6].

Из описания конструкции такой стены ясно, что она обладала упруго-пластическими свойствами, которые придавала стене центральная часть, состоявшая из мягкого кирпича на пластичном растворе из глины и битума. Колебания грунта при землетрясении, передававшиеся такой массивной стене, гасились в ней за счет ее вязкости и податливости. Общая же устойчивость стены здания обеспечивалась поперечными стенами и контрфорсами (рис. 6).

Такая конструкция сейсмостойкой стены применялась более 5 тыс. лет тому назад. Ясно, что эта стена способна без обрушений противостоять не только сейсмическим воздействиям, но и неравномерным осадкам грунта. Идея конструкции массивной стены, состоящей из жесткой облицовки и мягкого сердечника, будет встречаться и дальше вплоть до нашего времени. Будут меняться материалы и конструкции зданий, а принцип трехслойной стены останется тем же.

Еще одно антисейсмическое мероприятие, которое применялось уже тогда — это строительство монументальных сооружений (храмов, дворцов) на огромных сильно заглубленных платформах. Такие сооружения на платформах возводились во многих древних государствах от Китая, Персии, Египта до Мексики. Зиккурат в городе Ур, построенный в конце III тыс. до н.э., стоит на громадной прямоугольной платформе размером 43×65 м и высотой 15 м над поверхностью земли (рис. 7). Конструкция этого храма была такой же, как и конструкция стен: сердечник из сырцового кирпича на битумном растворе, облицованный обожженным кирпичом. По сути дела, это была искусственная гора. Необходимо обратить внимание на идеальную форму этой горы с точки зрения сейсмологии: равномерное и симметричное расположение масс и пониженное расположение центра тяжести всего сооружения.

Как работают платформы, подобные указанной под зиккуратом в Уре, в условиях сейсмического воздействия? Размеры поверхностной сейсмической волны соизмеримы с размерами платформы, и задача большераз-

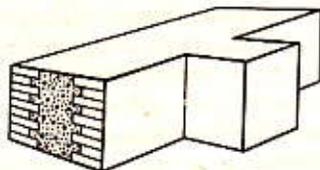


Рис. 6. Древнейшая сейсмостойкая кладка

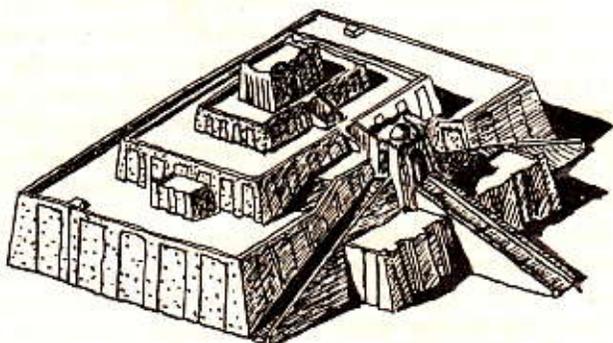


Рис. 7. Зиккурат III тыс. до н.э.

мерной жесткой платформе сгладить эту волну. На сооружение, защищенное такой платформой, передается осредненное без резких пиков сейсмическое движение грунта.

Применялись жесткие платформы под храмами, дворцами и даже целыми городами. Назначение их многоцелевое: оборонительное, произвести впечатление на верующего или подданного, подавить его величием, когда он приближается к храму или дворцу, создать надежный фундамент под сооружением, обеспечивающий антисейсмическую защиту. Если, как мы увидим дальше, греки и римляне закладывали свои фундаменты на коренных породах, то жители Двуречья этого не могли себе позволить, так как рыхлые породы там залегали на очень большой глубине. Поэтому они и создавали искусственное основание в виде гигантских платформ.

В I тыс. до н.э. в воинственной Ассирии, зодчие которой заимствовали многие строительные приемы у шумеров, возводились еще более гигантские платформы. Город Дур-Шаррукин, резиденция царя Саргона II, был построен всего за 5 лет (712–707 гг. до н.э.). Стены были сложены хоть из кирпича-сырца, но на фундаменте из крупных каменных глыб. Примерно через 20 м стояли башни-контрфорсы. Интересно, что цитадель, где находились храмы, дома придворных и дворец Саргона II, была размещена на платформе площадью почти 10 га и высотой над землей 14 м. Платформа была сооружена из кирпича-сырца и облицована камнями весом до 14 т [7]. В этом городе широко применялись, как и вообще в Двуречье двумя

тысячелетиями раньше, различные своды. Но о сводах разговор будет отдельный, пока не будем касаться этого вопроса.

Немного поговорив о древнем Шумере в долине Евфрата, естественно вспомнить о хараппской цивилизации в долине Инда. Все строительство там было основано на кирпиче. Первый период ее государственного существования относится к 3200–2400 г. до н.э. [7]. Поражает высокий по тому времени уровень строительной культуры и благоустройства городов: широкие прямые улицы, застроенные стандартными многоэтажными домами из обожженного кирпича, одинаковая планировка городов, одна весовая единица и типовые массовые гончарные изделия. Применялся кирпич хорошего качества, но на плохом растворе из местных речных наносов, поэтому он мог быть использован многократно. Известковый раствор применялся редко. Здесь также воздвигались из кирпича гигантские искусственные платформы. В одном из крупнейших городов цивилизации хараппов в Мохенджо-Даро была устроена цитадель на платформе высотой 9–15 м, шириной 190 м и длиной 380 м, сверху она была укреплена двойными стенами толщиной в основании 12 м и высотой около 11 м. Предполагается, что в цитадели на платформе были сосредоточены административные и культовые центры. По одной из гипотез хараппская цивилизация погибла от наводнения, всемирного потопа, возникшего от сильного землетрясения, изменившего рельеф долины Инда до такой степени, что образовалось озеро, поглотившее города этого государства.

Несколько обособлена от первых двух древняя крито-микенская цивилизация. Она изучена лучше.

Район островов Эгейского моря отличается высокой сейсмической активностью, где уже тогда был накоплен большой опыт сейсмостойкого строительства. В связи с этим там существовал культ неугасимого огня, посвященного богу – “колебателю земли”, которого этой жертвой постоянно надо было задабривать [8], а жителям горящий огонь постоянно напоминал о грозящей им беде.

Если в упомянутых выше восточных цивилизациях антисейсмические приемы, например, такие, как перевязка кирпичной кладки, утолщение стены к низу для устойчивости, устройство контрфорсов, вырабатывались на основе интуиции, то в крито-микенской архитектуре и в более поздней, связанной с ней греческой, чувствуется система и знание основ работы конструкции, которые и позволяли вырабатывать специальные приемы создания сейсмостойких сооружений. Несмотря на то что основным строительным материалом был камень, обладающий свойствами жесткости и хрупкости, конструкциям, возводимым из него, греческие строители стремились придать свойства податливости и упругости и объединить все несущие конструкции в единую, связанную во всех направлениях систему.

Рассмотрим Кносский дворец, относящийся к так называемому средне-минойскому периоду (2100–1600 гг. до н.э.) эгейской культуры на Крите. Кнос – столица легендарного царя Миноса, открыта английским археологом А. Эвансом и знаменита руинами дворцового ансамбля площадью

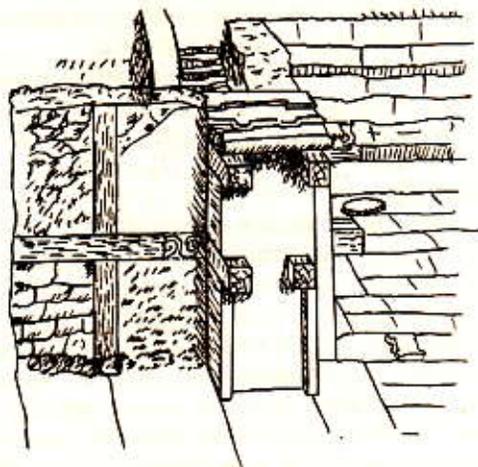


Рис. 8. Армирование деревом каменной кладки, Кносский дворец, XV в. до н.э.

24 тыс. м<sup>2</sup> [8]. Основным строительным материалом служил натуральный гипс, из которого изготовлялись крупные блоки. С точки зрения сейсмичности это плохой материал, хрупкий и недостаточно прочный. Все это прекрасно понимали строители Кносского дворца, стремясь придать кладке стен нужные качества. Они прежде всего тщательно пригоняли каменные блоки, обеспечивая этим максимальную прочность всей стены. Раствор не применялся, каменные блоки соединялись деревянными штырями, что придавало кладке некоторую податливость. Толстые наружные стены облицовывались поставленными на ребро плитами, которые чередовались так, что часть их шла параллельно стене, а часть поперек. Образовавшаяся между плитами пустота плотно засыпалась различным строительным мусором. Но самое главное и интересное заключается в том, что кладка стен в вертикальном и горизонтальном направлениях основательно армировалась деревянными брусьями (рис. 8). Это объединяло всю стену в монолит, обладавший упругими свойствами и работавший как единое целое. Точно таким же образом, каменными блоками и деревянными брусьями, стены связывались между собой и с перекрытием в единую замкнутую систему, обеспечивавшую сейсмостойкость зданию. Кстати, наличие большого количества дерева в каменной кладке снижало ее вес.

Любопытны деревянные колонны, применявшиеся в Кносском дворце. Они расширялись сверху и сужались внизу. Вид их необычен, а правильнее сказать непривычен. Если же хорошенько задуматься, то, пожалуй, это сделано правильно. Опирает балки приходится на верхний конец колонны, а широкий конец бревна — это и есть готовая капитель, где удобно разместить опорные части балок. В нижней же части такой колонны готов шарнир, который обеспечивает работу колонны только на сжатие без изгиба.

Большое внимание на Крите уделялось подготовке грунтового основания под сооружение. Малейшие неровности грунтового основания выравнивались, стесывались, углубления и расщелины заполнялись строительными материалами. По склонам холма уступами создавались ровные площадки, на которые ставились сооружения. Между грунтовым основанием и фундаментом сооружения обязательно устраивалась песчано-щебнистая прокладка, в задачу которой входило равномерно распределить нагрузку от фундамента и смягчить силу подземного удара.

Здания в Кносском дворце были по крайней мере трехэтажные. Первый этаж был почти всегда заглубленным, подземным, число связанных продольных и поперечных стен в нем было больше, чем в верхних этажах. Это все обеспечивало прочное и надежное основание под верхние этажи [8].

С Кносским дворцом связано много загадок. Например, почему у него не было оборонительных стен? Разве у обитателей такого богатого дворца не было врагов? Или другая загадка. Из раскопок следует, что спальни, как правило, находились в нижних подземных этажах. Почему? И.А. Резанов [9] утверждает, что под землей жители Крита прятались от землетрясений, так как амплитуда поверхностных волн с глубиной уменьшается. Это правильно, эффект землетрясения действительно с глубиной убывает, но тогда надо делать такое перекрытие над первым подземным этажом, чтобы оно выдержало рухнувшие верхние этажи.

Кносский дворец, расположенный в самой активной сейсмической зоне острова Крит, был разрушен землетрясениями, часто происходящими в этом районе. Видимо, тех антисейсмических мероприятий, которые применялись, не хватило, чтобы дворец простоял до наших дней. Это естественно, так как основную гибкость и монолитность конструкции придавал такой недолговечный материал, как дерево. Вот мы побывали в древнейших цивилизациях и очень кратко познакомились с их строительными приемами, но уже из этого видно, что три-четыре тысячелетия тому назад существовала проблема сейсмостойкого строительства, что уже тогда началась активная борьба человека со стихией, которая продолжается и сегодня, и что основы такого строительства были заложены тогда.

Продолжим наше путешествие по древнейшему греческому миру.

### СЕЙМОСТОЙКОСТЬ ТРОЯНСКОГО КОНЯ

Побываем в легендарной Трое, воспетой в "Илиаде" Гомера и расположенной на берегу Эгейского моря. Археологические раскопки Г. Шлимана и В. Дерпфельда показали, что Троянский холм содержит в себе по крайней мере слои девяти Трой. Троя I возникла за 2 тыс. лет до Трои Гомера на рубеже IV и III тыс. до н.э. Последующие Трои последовательно этажами наслаивались одна на другую. Та Троя, которую греки захватили с помощью военной хитрости Одиссея, была уже седьмой по счету [6].

Легендарный троянский конь [6] был идеальной сейсмостойкой конструкцией, он отвечал всем принципам, сформулированным выше: умеренные размеры (конь был величиной с 2-3-этажное здание), симметрич-



Рис. 9. Сейсмостойкий троянский конь

ная конструкция, упругий и легкий материал – дерево, сейсмоизоляция с помощью колес, на которых он стоял (рис. 9).

Сооружения самой Трои такой идеальной сейсмостойкостью не обладали. Для нашего путешествия давайте выберем Трою VI, основанную греками племенами, процветавшую уже к середине II тыс. до н.э. Это был богатый укрепленный город с застройкой хорошего качества. И все-таки Троя VI погибла от землетрясения в XIV в. до н.э. Не хватило тех антисейсмических мероприятий, которые применялись тогда. Давайте рассмотрим эти мероприятия.

Как показали раскопки, Троя VI представляла собой грандиозную для того времени систему обороны, состоявшую из стен, башен и других подсобных помещений, построенных из крупных каменных блоков, хорошо обтесанных, плотно пригнанных друг к другу, уложенных ровными горизонтальными рядами. Вес некоторых блоков доходил до 2–3 т. Часть длинных камней укладывалась поперек стены "тычком", что еще больше увеличивало прочность стен. Стены, башни, здания имели фундаменты, выложенные из особо крупных блоков и заглубленные до скальных пород. При неровной поверхности в скале вырубалось специальное ложе под фундамент. Для большей устойчивости стены и башни имели большой наружный уклон. Все эти приемы сейсмостойкой кладки были разработаны уже тогда.

Кстати, в более древней Трое применялась несколько другая конструкция сейсмостойких стен. Для придания стене свойств податливости нижняя ее часть выполнялась из камня, а верхняя из кирпича-сырца, и все это армировалось деревом.

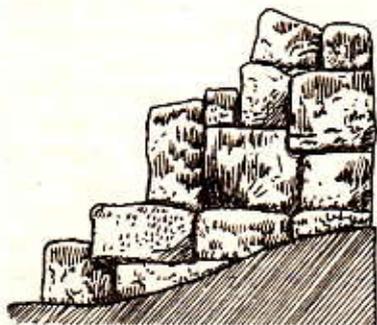


Рис. 10. Циклопическая кладка Древней Греции, Микены



Рис. 11. Разгрузочный треугольник Львиных ворот, Микены, XVI в. до н.э.

Самым же интереснейшим архитектурным ансамблем того времени являются Микены. Их наибольший расцвет приходится на XII–X вв. до н.э. Материковая Греция того времени, раздробленная на мелкие враждующие племенные союзы, была чрезвычайно неспокойна. Это породило многочисленные хорошо укрепленные пункты. Таким пунктом были Микены, недалеко от них находились также хорошо укрепленные Тиринф, Аргос и др.

Оборонительные сооружения Микен были расположены на горном отроге с недоступными обрывами. С двух сторон, где скала покато спускалась в долину, высились неприступные стены.

Стены, сложенные из чудовищных глыб камня, казались древним грекам сооружением сказочных великанов – циклопов, поэтому такую кладку стен стали называть циклопической. Глыбы камня поднимали с невероятным трудом, пригоняли по месту и укладывали одну на другую. Сцепленные между собой силой собственного веса эти глыбы крепко держали друг друга (рис. 10). В наиболее ответственных местах, для того чтобы еще больше укрепить кладку и предохранить блоки от скольжения в случае сотрясения, их по горизонтальным швам усиливали деревянными вертикальными штырями, вставленными в отверстия, имеющиеся в верхнем и нижнем блоках [8].

Но самое здесь интересное – это главные ворота микенских укреплений, которые называют “Львиными” (рис. 11), простоявшие более 30 столетий до настоящего времени. Они сложены из четырех гигантских блоков при квадратном просвете ворот размером 3×3 м. Один блок составляет порог, два других, вертикально стоящих блока, поддерживают четвертый, перекрывающий отверстие прохода. Этот гигантский блок имеет длину 4,5 м и весит 20 т [6]. Конструкция этих ворот такова, что вес вышележащей кладки не передается на этот четвертый блок, потому что каменная кладка над воротами образует так называемый ложный свод,

выполненный постепенным надвигом блоков. Получившаяся пустота заложена треугольным камнем с изображением львов. Подобная конструкция, снижающая нагрузку над проходами в стенах зданий, стала называться разгрузочной системой. В дальнейшем мы часто будем встречаться с различными конструктивными решениями разгрузочных систем.

Глядя на конструкцию этих ворот, остается только восхищаться тем, как много знали древние строители об особенностях работы материала в конструкции. Они понимали, что камень хорошо работает на сжатие и плохо на изгиб, поэтому и устроили разгрузочный треугольник над балкой, работающей на изгиб, в которой камень в нижней зоне растянут. Больше того, так как в центре балки изгибающий момент максимален, то для того, чтобы снизить растягивающие напряжения в камне, они сделали центральную часть балки утолщенной. А для того чтобы еще больше разгрузить центральную часть балки, они придавили ее концы каменной кладкой основания ложного свода, сделав ее статически неопределимой, и этим как бы оттянули часть изгибающих моментов от центра пролета на концы. Когда смотришь на эти ворота, невольно возникает мысль, что современный инженер не смог бы лучше спроектировать такое сооружение из камня, пользуясь самой современной теорией расчета конструкций.

В нижнем городе до нашего времени сохранились очень интересные по своей конструкции погребальные сооружения, так называемые купольные гробницы. Поговорим об одной из них – гробнице Атрея (XIV в. до н.э.) – легендарного правителя Микен. Конструкция этой гробницы была доведена до совершенства. У нее был ряд предшественников, но из-за тех или иных просчетов многие из более древних гробниц рухнули, а гробница Атрея, обладая в силу своего конструктивного решения высокой сейсмостойкостью, стоит уже почти 35 столетий.

Погребальная камера гробницы имеет высоту 13,2 м, диаметр кругового очертания в плане 14,5 м (рис. 12). Кривая купола начинается от пола и образуется постепенным напуском горизонтальных колец. Отеска внутренней поверхности по кривой производилась после укладки блоков. Самые крупные каменные блоки уложены в нижней части стены, выше стены становятся тоньше и каменные блоки меньше. Как видно из рис. 12, профиль купола имеет стрельчатое очертание. Оказывается, что такая конфигурация купола хорошо отвечает антисейсмическим требованиям. В толще купола имеются два дверных проема – высокий и низкий, оба они перекрыты каменными балками, над которыми выложены разгрузочные треугольные проемы. Купол гробницы Атрея выложен по системе ложного свода, т.е. с постепенным напуском камней. Весь массивный купол находится под землей, что создает внешнее, обжимающее кольца купола давление. Материалом служит местный кремнистый известняк большой плотности [6].

Итак, конструкция гробницы Атрея отвечает основным принципам сейсмостойкого строительства: хорошие пропорции, осевая симметрия, стрельчатая форма купола, облегченная сверху, снятие концентрации напряжений в местах отверстий в куполе, прочный материал с возможной подвижкой по горизонтальным швам, выполненным всухую.

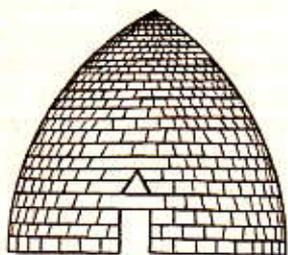


Рис. 12. Стреловидный купол и разгрузочный треугольник гробницы Атрея, Микены, XIV в. до н.э.



Рис. 13. Разгрузочная система над входом в гробницу, Мениди

Древние строители проводили даже такие мероприятия, как снятие концентраций напряжений в конструкции. В купольной гробнице в Мениди над широким дверным проемом устроена такая остроумная разгрузочная система, что в балках, перекрывающих проем, нет другой нагрузки, кроме их собственного веса. Система эта устроена так: над проемом в толстой стене уложены мощные монолитные балки, а над ними с узкими зазорами уложено четыре ряда тонких плит (рис. 13). Видно, что на балку вообще нет никакой дополнительной нагрузки.

Несколько слов скажу об уже упоминавшемся Тиринфе, акрополь которого со стенами и новым дворцом был достроен в XIV–XIII вв. до н.э. Оборонительные сооружения Тиринфа поражают своей мощью, стены толщиной 8–17 м сложены из огромных блоков циклопической кладки. Хочу обратить внимание только на один конструктивный элемент. В оборонительных конструкциях города устраивались антисейсмические швы, разрезающие сооружения сложной конфигурации или очень длинные сооружения на простые элементы, обеспечивая тем самым их независимую деформацию. Башни не связаны единой конструкцией кладки со стеной. Между ними имеется как бы скользящий шов, позволяющий стене и башне колебаться независимо, что снимает концентрации усилий, которые возникли бы здесь при землетрясении или при неравномерной осадке стены и башни. Это удобно и с оборонительной точки зрения. Если башня будет разрушена врагом, то, рухнув, она не потащит за собой стену. На простейшие элементы разрезана и волнистая стена обороны. Имеется также шов между стеной и зданием дворца [8].

Таким образом, мы нашли у древних строителей почти все принципы, обеспечивающие зданиям сейсмостойкость.

## ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ ВМЕСТО ЦЕМЕНТА

Когда переносишься мыслями в Египет, то представляешь разливы Нила, несущие плодородную грязь, просмоленные мумии фараонов, изящные скульптуры Нефертити, а для тех, кто интересуется строительством, возникают тяжелые пирамиды и храмы, скрепленные своим собственным весом.

Если немного поглубже задуматься о невероятно тяжелых египетских конструкциях, то кажется, что они вступают в противоречие с одним из основных принципов сейсмостойкого строительства – снижением собственного веса сооружения. Создается впечатление, что египетские монументальные сооружения специально делаются как можно тяжелее. Здесь вы не найдете пустот в конструкции или легких заполнителей, нацеленных на снижение веса пирамиды или храма. И однако эти сооружения простояли в условиях сейсмического воздействия несколько тысячелетий. В чем же тут дело? Может, и не надо снижать вес сооружения? Надо, конечно. Но для сверхтяжелых сооружений вступают в силу другие закономерности, приобретает основное значение фактор взаимодействия колеблющегося во время землетрясения грунта и лежащего на нем гигантского массива. За счет этого взаимодействия снижается эффект землетрясения и сверхтяжелое сооружение не получает тех смещений и ускорений, которые получило бы стоящее на этом месте легкое здание.

Кстати, сохранились сверхтяжелые конструкции не только в Египте. На Кавказе в условиях высокой сейсмичности до сих пор стоят более древние, чем египетские пирамиды, мегалитические дольмены. У гробницы Атрея с центральным помещением, образованным ложным стрельчатым куполом, имеется боковая камера, перекрытая всего двумя каменными плитами, из которых одна размером  $8 \times 5 \times 1,2$  м весит более 100 т. Эта конструкция, несмотря на свою тяжесть, также прекрасно сохранилась [6].

Так что создание сверхтяжелых сооружений – это тоже возможное направление разработки сейсмостойких конструкций, но большинство задумок шло и идет все же по пути облегчения зданий, так проще и экономически выгоднее.

Итак, рассмотрим некоторые египетские сооружения с точки зрения принципа тяжести и проанализируем, как собственный вес сооружения обеспечивает его целостность и монолитность, заменяя цементный раствор.

Немного поговорим о пирамидах. В этих сооружениях настолько все гармонично, что говорить о какой-то специальной сейсмозащите не приходится. Действительно, пирамиды имеют идеальные формы с точки зрения сейсмостойкости. В них воплощены все принципы, записанные выше, кроме требования снижения веса.

Рассмотрим конструкцию пирамиды Хеопса, сооруженную в XXVI в. до н.э. во времена Древнего царства (рис. 14). Она имеет высоту 146,5 м, длину стороны основания 233 м. Эта пирамида сложена из тщательно отесанных и плотно пригнанных известняковых блоков. Вес блоков составляет 2,5–30 т. Самая большая их высота (1,5 м) – в нижней части пирами-

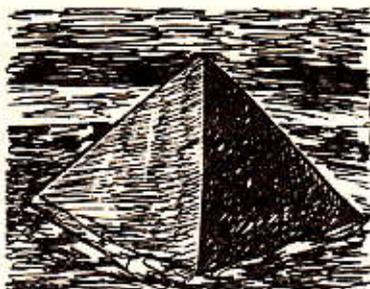
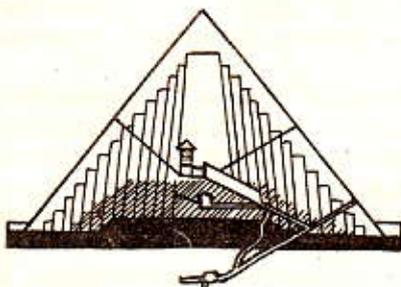


Рис. 14. Геометрическая гармония пирамиды Хеопса

Рис. 15. Разгрузочная система погребальной камеры пирамиды Хеопса



ды, вверху высота блоков постепенно уменьшается и достигает на вершине 55 см. Внутри пирамиды, за исключением погребальной камеры и коридоров (рис. 15), кладка сплошная. Снаружи пирамида облицована шлифованными плитами известняка [6]. Каменные блоки уложены без раствора, да это и не требуется при таком их размере. Необходимо только, чтобы они были хорошо пригнаны, тогда прочность и однородность кладки будет гарантирована. Связующий раствор, собственно, нужен тогда, когда каменные массивы образуются из мелкоштучного материала. Хочу обратить внимание на самое ответственное место в пирамиде, ради которого она и строилась, — на погребальную камеру (см. рис. 15). Здесь опять разгрузочная система. Несколько дублирующих друг друга плит перекрывают помещение камеры, а самые верхние плиты стоят, упираясь друг в друга, наклонно. Это самые ответственные и нагруженные плиты, и поэтому изгибающий момент в них снижен и они частично работают на сжатие. Это уже упрощенная конструкция свода.

Итак, если проанализировать конструкцию пирамиды с точки зрения принципов сейсмостойкости, то получим: массы и жесткости в сооружении распределены равномерно, симметрия соблюдается, пониженное положение центра тяжести, высота, ширина и длина соизмеримы, кладка прочная. Тело пирамиды представляет собой однородный массив, поэто-

му в ней нечему сломаться, нет перекрытий и куполов, которые могли бы рухнуть. Получается, что с точки зрения сейсмостойкости в египетской пирамиде все сделано правильно. Перейдем к египетским храмам, где конструкции более сложны и разнообразны.

Самые большие и великолепные храмы были сооружены в Египте во времена Нового царства (XVI—XI вв. до н.э.). Рассмотрим конструктивные приемы, которые применялись в них и обеспечивали им сейсмостойкость.

Начнем с подготовки грунтового основания под фундаменты, которому египтяне придавали большое значение, хотя не имели представления о тех сложностях механики грунтов, о которых знаем мы. В соответствии с тем, на каких грунтах возводилось сооружение, готовилось и грунтовое основание.

Если здание возводилось на равнинной части, где были слабые грунты, то грунт заменяли. Прием замены плохого грунта применялся широко будущими поколениями. Выкопав котлован или траншею и удалив слабый грунт, египтяне насыпали слой сухого песка необходимой толщины. Это уже была, по сути дела, часть фундамента, поскольку уплотненный песок почти не сжимается.

Если же строительство шло на скальных грунтах, то выравнивалась площадка под будущее здание. Удалялась лишняя скала, а впадины забивались гравием и песком. Храм Рамзеса IV в Дер эль-Бахри возводился на скале, которая выходила на поверхность в виде откоса. Чтобы избежать возможного скольжения фундамента во время землетрясения, скалу разровняли и сделали горизонтальной. Пришлось выбить в скале выемку размером 240 × 40 м. Дно котлована было ступенчатым с высотой уступов около 0,5 м. Затем на это ступенчатое дно котлована насыпали сухой песок, а уже на него укладывали каменные блоки фундамента, т.е. обязательно создавалась песчаная подушка между фундаментом и скалой, так делали и все последующие древние строители. Современные этого, к сожалению, не делают.

Назначение песчаных прослоек между фундаментом и грунтом двоякое. С одной стороны, обеспечивается равномерная передача нагрузки на грунт, отсюда равномерные осадки и отсутствие концентрации усилий в фундаменте, с другой — это уже система сейсмоизоляции, смягчающая сейсмический удар и позволяющая сооружению проскальзывать по песку относительнодвигающегося во время землетрясения грунта. Уже во времена Среднего царства (конец III тыс. до н.э. — XVII в. до н.э.) основания колонн устанавливали на песчаные подушки толщиной до 80 см. При этом толщина песчаной подушки зависела от веса той конструкции, которая на ней стояла. Так, под тяжелым пилоном в Рамессуме она была в 2 раза толще, чем под обычной стеной.

Фундаменты египетских сооружений отличаются большим разнообразием. Есть очень несовершенные конструктивные решения, когда достаточно слабые известковые блоки фундаментов укладывались непосредственно на грунт. Существуют и весьма совершенные конструкции фундаментов, поражающие своей продуманностью. Так под третьим пилоном Большого Храма Амона имеется фундамент, состоящий из боль-

ших каменных блоков длиной до 4 м и шириной до 1 м. Укладывались эти блоки в песок на ребро ряд за рядом, между ними были установлены поперечные балки. Такой фундамент представлял собой прочное ядро с размерами в плане 38 × 6,3 м и высотой 6 м. Блоки, поставленные на ребро, несомненно, увеличили прочность фундамента при работе его на изгиб.

Интересно устроены фундаменты под огромные колонны, названные именем фараона Тахарки, стоящие в первом дворе Большого Храма Амона. Котлован под фундаменты колонн вырыт в очень плотном грунте. Сам же фундамент представляет собой три слоя свободной каменной кладки толщиной до 30 см каждый, разделенных песчаными подушками толщиной 10–20 см, а под всем фундаментом устроена еще песчаная подсыпка в 1 м толщиной. Весь этот слоистый фундамент был взят в обойму из кирпично-сырцово́й стены. В результате песок хорошо сохранился, так как не был выдавлен из-под фундамента. Ясно, что все эти фундаменты с прослойками песка работают как сейсмоизоляторы.

Вообще в эпоху Нового царства наблюдается значительный прогресс в развитии строительного искусства, в том числе в создании прочных фундаментов. Фундаменты закладывали более глубоко (до 5–6 м, вместо 2–3 м). Вместо обычного известняка применялся более прочный песчаник. Египтяне явно стремились сделать фундамент более монолитным, собирая его из крупных плотно уложенных блоков [10].

Конструкция стен трехслойная, два внешних слоя составляют облицовку, а внутренний слой – забутовку. Так, в погребальном ансамбле фараона Джосера, куда входила знаменитая многоступенчатая пирамида Джосера, относящаяся ко времени Древнего царства, тройная стена, окружающая его, имела толщину 15 м и высоту 10 м. Она состояла из внешних известковых плит облицовки, а пространство между этими стенами было засыпано обломками камня и кирпича. Стены храмов времени Нового царства не были уже такими толстыми, как более древние, но все также состояли из трех самостоятельных стен, из которых средняя была несущей, а две внешние стены – облицовочными. Уже не применялись те гигантские стеновые блоки весом по 10 т, а использовались небольшие или средние камни весом до нескольких тонн. Толщина стен составляла 1,2–4 м, вместо 15–20 м, как это было в Древнем царстве [10].

С точки зрения сейсмостойкого строительства, указанная конструкция стен имеет один крупный недостаток: все каменные блоки в стенах укладывались в длину один за другим и не было блоков, уложенных поперек стены, которые осуществляли бы связь между частями трехслойной стены. Как сказали бы каменщики, все ряды камня были ложковые и не было тычковых рядов. В результате вся стена уже не была монолитной, ее части могли соударяться и независимо рассыпаться.

Более совершенная конструкция трехслойных стен по так называемому казематному методу применялась в Сабейском царстве, существовавшем на границе II и I тыс. до н.э. на территории современного Йемена. Две параллельные стены, сложенные из каменных блоков на крепком растворе, подобном цементу, или на асфальте, соединялись поперечными

камнями, уложенными тычком; образовавшаяся при этом внутренняя пустота стены заполняется землей, песком или бутом [6]. Асфальтовый раствор придает облицовочным частям стены некоторую податливость, поперечные камни обеспечивают связь между частями и, следовательно, целостность всей стены, а земля или песок внутри стены хорошо гасят ее колебания во время землетрясения.

По-видимому, египетские строители осознавали конструктивные недостатки своих стен и старались их исправить.

Прежде всего отмечу, что раствор в египетской кладке практически не использовался. В немногих случаях обнаруживаются следы гипса, но неизвестно применялся ли он как раствор или как смазка при установке на место каменных блоков. Камни держались силой своей тяжести, а чтобы еще лучше их скрепить и образовать один монолит, блоки в древности связывались скобами по системе "ласточкин хвост" (рис. 16). В верхней части двух соединяемых камней друг против друга вырезали пазы, соответствующие половине скобы-лапы, и ее вставляли туда. Все камни стен храмов оказывались застегнутыми на эти "крючки". Интересно, что у египтян такие связи расположены всегда в длину стен, а не поперек и не по высоте, как будут делать в Греции. Видимо, египтяне специально стремились обеспечить независимость работы трех слоев стен.

В Египте делали скобы из дерева, гранита, меди или бронзы. Археологи до сих пор находят сохранившиеся деревянные "ласточкины хвосты", выполненные из черного дерева тропической Африки, кстати, для соединения крупных каменных блоков Кносского дворца также применялись деревянные скобы.

Храмы в Египте имели плоские каменные крыши, тяжесть которых держали каменные колонны и балки. Так вот, балки, лежащие на колоннах, также соединялись в замок, напоминающий "ласточкин хвост". В одной балке устраивали паз, куда входил выступ от другой.

Позднее, уже в IV в. до н.э., появились и другие способы соединения камней. Например, в храме Исиды в Дельте облицовочный каменный блок с обратной стороны имел шип, входивший в отверстие следующего блока, а в камнях существовали Т-образные отверстия, которые позволяли соединять облицовочные камни с внутренними с помощью металлических скоб.

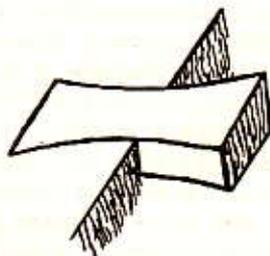
В заключение путешествия по Египту давайте поговорим о колоннах, пожалуй, самых ответственных архитектурных и конструктивных деталях сооружения. Еще в III тыс. до н.э. в Египте возникла традиция применять колонны как главное архитектурное украшение (а не только для поддержания кровли), которая продолжалась в эпоху Среднего и Нового царства. В храмах применялось такое количество колонн, что их можно сравнить с букетом цветов. В небольшом храме Тутмоса III на площади 38 × 28 м размещено 92 колонны, самые большие имели диаметр 1,33 м, расстояние между ними составляло всего 2 м.

Во времена Нового царства колонны имели отношение высоты к диаметру равным пяти и четырем, т.е. были массивными и тяжелыми.

Первые каменные колонны были применены в архитектурном ком-

плексе пирамиды Джосера (XXVIII в. до н.э.). Они были составными, при высоте 5–6 м имели до 30 слоев мелкоштучной каменной кладки без раствора. Ясно, что такие колонны будут рассыпаться в условиях сейсмического воздействия, если не обеспечить тщательную подгонку камней по горизонтальным слоям. Должно быть обеспечено равномерное загрузе-ние и обжатие каждого слоя камня, чего очень трудно добиться даже при современной технике. Однако такие колонны создавались. Позднее перешли к монолитным каменным колоннам, которые продолжали строить

Рис. 16. Скрепление камней по системе "ласточкин хвост"



и в эпоху Среднего царства. Достоинства монолитных колонн не будем разбирать, это, собственно, идеальный случай с точки зрения сейсмостойкости каменных сооружений. Во времена Нового царства опять перешли к сборным колоннам, но уже другой конструкции.

В отличие от эпохи Джосера, когда в кладку шли камни небольшого размера, 1500 лет спустя стали употреблять более крупные блоки. Каждый слой состоял теперь всего из двух полуцилиндров высотой 0,5–1 м. Вес каждого такого полуцилиндра в зависимости от размера и материала был равен 6–10 т. Для обеспечения равномерного загрузе-ния материала таких колонн, которое гарантировало бы их прочность и надежность, необходима была точная пригонка горизонтальных поверхностей полубарабанов, что легче сделать при двух элементах слоя, чем когда этих элементов много. Обеспечивая местную устойчивость составных элементов колонн, полуцилиндры ставили таким образом, что положение вертикальных стыков между ними совпадало только через слой. В дополнение к гигантской вертикальной нагрузке, удерживающей от выпадения отдельные элементы колонн, полубарабаны в месте стыка соединялись деревянными скобами по системе "ласточкин хвост", вставленными в специальные углубления в верхней их части. В Большом Храме Амона длина скобы равнялась 38 см при наибольшей ширине 11 см [10]. Такая небольшая ширина деревянных скоб при многотонных каменных барабанах наводит на мысль, что это были просто монтажные элементы, но изучение более поздних греческих архитектурных памятников показало, что это не так, это были все-таки слабоватые, но конструктивные элементы, поэтому в более поздние времена их заменил металл.

Над храмами устраивались плоские каменные перекрытия. В этом случае колонны наверху соединялись балками всего в несколько метров длиной. Часто их делали из гранита. Иногда балки, перекинутые от одной

колонны к другой, представляли монолиты, но чаще балки были составными из двух—четырёх камней, соединённых между собой. В Большом Храме Амона встречаются необычайной формы балки, у которых причудливо оформлены стыки в виде двух закруглённых "клювов" у одних балок с соответствующими отверстиями для них у других. Вес балок-монолитов мог достигать 100 т и более, как это было в Храме Аменхотепа III. Как уже говорилось, элементы барабанов колонн имели только горизонтальную связь. Их соединяла огромная тяжесть от веса балок и перекрытия, которая заменила цемент, применяющийся в наше время для связи камней. Эти составные колонны простояли уже более 3 тыс. лет.

Таким образом, система, образованная колоннами, связанными в верхнем уровне продольными и поперечными балками, объединёнными между собой податливыми креплениями и плитами перекрытия, разделённая на отдельные секции ограниченной длины, была очень устойчивой [10] благодаря тому, что связь между элементами конструкции не была жесткой, гигантская тяжесть оказывалась распределённой равномерно. При этом любопытно, что разрушение одной колонны вело к разрушению не всей системы, а только отдельного участка, вся остальная конструкция сохраняла равновесие, удерживаемое огромной тяжестью.

За свое многотысячелетнее существование древние египетские храмы перенесли множество подземных бурь. При их весе в них должны были возникнуть невообразимые инерционные сейсмические силы, которые эти храмы уже точно должны были разрушить, так как здесь явно нарушен один из основных принципов сейсмостойкого строительства — снижение веса сооружения. Кроме того, несущие конструкции храмов выполнены из хрупкого материала — камня, податливость стыков является спорным вопросом. Я попытался выше объяснить сейсмостойкость этих сверхтяжелых сооружений взаимодействием податливого грунта и здания, но этого здесь явно мало. Для ответа на вопрос о сейсмостойкости египетских храмов нужно специальное детальное их обследование. Однако совершенно ясно, что у древних египетских зодчих существовал свой взгляд на то, как создавать сейсмостойкие храмы.

## ОДНИМ СЛОВОМ — ГРЕКИ

### АНТИСЕЙСМИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ДРЕВНИХ ГРЕКОВ

Область распространения древнегреческой культуры охватывала не только собственно саму Грецию, т.е. южную часть Балканского полуострова, города и колонии эллинских племен были разбросаны по берегам всего бассейна Средиземного моря, а также Северного Причерноморья и Малой Азии. В V в. до н.э. во времена победоносных греко-персидских войн и победы над Карфагеном греки продвинулись в глубины Азии и Африки, а в IV в. до н.э. войска Александра Македонского захватили Египет, достигли Индии и Средней Азии, создав ряд греко-восточных монархий. Ясно, что при такой широте распространения греки должны были не только знакомить другие народы со своей культурой и

строительным искусством, но и поглощать то, что узнавали в завоеванных странах. Так они собственно и делали и все-таки двух вещей в строительном деле от покоренных народов они не восприняли. В своей монументальной архитектуре греки не применяли купола, своды и растворы для связи камней в кладке.

Думаю, что это не случайно. У греческих строителей была своя теория сооружений, в том числе и своя теория сейсмостойкого строительства. Давайте попробуем представить себе концепцию, которой следовали древние строители Греции, создавая свои храмы с учетом требования сейсмостойкости.

В конструкциях греческих храмов применялась чрезвычайно простая стоечно-балочная система с податливыми связями. Несущие элементы — это стены и колонны, на которых лежат балки, поддерживающие настил перекрытия. Податливая связь между несущими элементами осуществляется в помощь железных штырей и скреп, залитых свинцом. Эта стоечно-балочная система господствовала в греческой архитектуре как в классический период (V в. до н.э.), так и в архаический (VIII—V вв. до н.э.).

Ясно, что в стоечно-балочной конструкции греческих храмов, где колонны и стены работают только на сжатие, нет места сводам и куполам, которые наряду с вертикальной нагрузкой на стены и колонны вызывают дополнительные горизонтальные усилия на них от распора. Организовать податливую связь между куполом и несущей стеной, а также заменить податливую связь, выполненную с помощью штырей и скоб, залитых свинцом, между элементами составных колонн, между колонной и балкой и между каменными блоками стен на жесткую связь на каком-то, например известковом, растворе невозможно. Все это будет противоречить стоечно-балочной конструкции с податливыми связями между элементами. Поэтому в Древней Греции нет ни куполов, ни строительных растворов, хотя, конечно, они о них знали. Арки, сложенные из клинчатых камней, встречаются в эпоху классики в погребальных камерах склепов, полуциркульные очертания имели многие перекрытия крепостных ворот уже в V в. до н.э. [11].

Есть еще одно предположение о том, почему древние греки не применяли куполов и арок [12]. Если делать перекрытия в виде купола, то для восприятия появившегося распора пришлось бы устраивать дополнительные инертные массы, которые значительно утяжелили бы сооружения. Применяемых стен и колонн уже было недостаточно для этого. Купола еще больше утяжелили бы греческие сооружения, и они потеряли бы свою четкую архитектурную композицию, а это противоречило бы одному из основных принципов сейсмостойкости — принципу антитяжести.

То, что строители Древней Греции стремились обеспечить достаточно податливую конструкцию своих уникальных храмов, подтверждает конструкция их фундаментов. Фундаменты зданий классической эпохи, как и эпохи архаики, возводились независимо под стенами и под отдельными колоннами. При неравномерных осадках таких фундаментов не возникали дополнительные напряжения ни в гибко связанных элементах перекрытия, ни в несущих стенах и колоннах, ни в фундаментах.

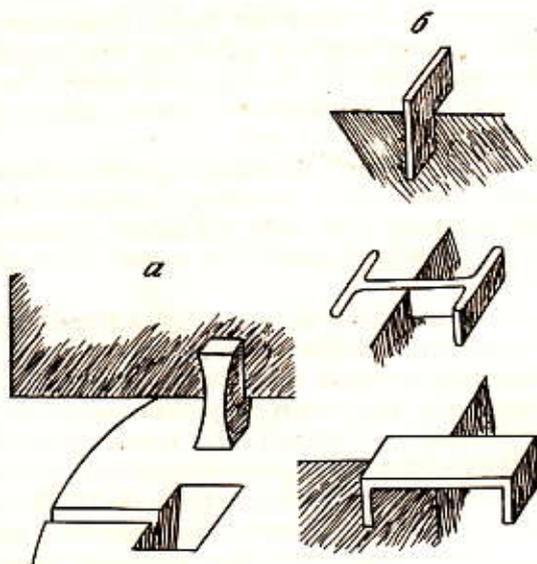


Рис. 17. Способы скрепления каменных блоков в Греции: *a* — пироны для соединения камней из соседних рядов; *b* — металлические скобы для соединения камней одного ряда

Важный вопрос — это крепление элементов греческих храмов между собой. Для крепления камней одного ряда применялись металлические скобы, которые имели форму просто пластины, двойных Т, П-образную форму, форму "ласточкиных хвостов" (рис. 17, б). Для скрепления квадров двух смежных рядов употребляются пироны, для которых устраиваются отверстия в нижнем и верхнем камнях [13]. В позднегреческих постройках форма этих креплений совершенствуется, так, пироны уже имеют утолщения на концах для лучшего сцепления с камнем (рис. 17, а). Эти пироны до установки верхнего камня на место вставляются в него и заливаются свинцом. Потом камень устанавливается на место так, что нижний конец пирона входил в отверстие в нижнем камне, где он также заливается свинцом через специальное отверстие. Точно так же заливаются свинцом и скобы, соединяющие камни одного ряда. В афинском Парфеноне в центре барабанов колонн вставлены деревянные пробки непосредственно в мрамор. Чтобы избежать опасности разбухания дерева применялась смолистая, мало впитывающая влагу древесина. При этом дерево вставлялось сырое, а потом оно постепенно усыхало. Чисто деревянные крепления применялись в VI в. до н.э. сицилийскими греками. Железные скрепы входят в употребление на материке только в V в. до н.э. Существовали и комбинированные скрепы, когда металлический штырь заделывался в деревянную пробку. Но заметьте, не встречается чисто металлических креплений, не заделанных в свинец или в дерево. Это, конечно, делалось неспроста. Мягкая прокладка из свинца или дерева смягчала удар жесткого металла о стенку отверстия в мраморе при зем-

летрясениях, поэтому почти нет отколов стенок отверстий, куда вставлены металлические скобы, заамортизированные свинцом или деревом, т.е. таким образом создается связь с упругопластическими свойствами, которая предохраняет элементы конструкций от соударения. Эти скобы и пироны в свинце — важные элементы сейсмозащиты греческих храмов. Кстати, одновременно свинец предохранял металлические скобы и пироны не только от ударов, но и от ржавления.

В силу указанных конструктивных приемов греческий храм нельзя рассматривать как абсолютно жесткое тело. Он состоит из отдельных каменных элементов, имеющих между собой упругопластические связи и высокий коэффициент затухания за счет точной шлифовки каменных блоков. Даже колонна, состоящая из отдельных барабанов, является довольно гибкой. В результате греческий храм отвечает почти всем принципам сейсмостойкости: имеет хорошие фундаменты, почти всегда обеспечена симметрия расположения масс и жесткостей, обладает способностью к подвижке и высоким коэффициентам затухания за счет податливой связи между элементами. И все же большинство греческих храмов было разрушено землетрясениями [13], хотя казалось, что такие постройки не должны были разрушиться никогда. Но дело оказывается в том, что большой вес перекрытия, состоящего из системы каменных балок, поднятых на большую высоту, соответственно повышал центр тяжести всего сооружения. Огромные массы материала, сосредоточенные на большой высоте, вызывали при землетрясениях огромные непреодолимые инерционные сейсмические силы, которые и разрушали сооружения. Хотя здесь не было того чудовищного веса, который характерен для египетских храмов, это оказалось более опасным.

В сейсмостойком здании все должно быть пронизано идеей сейсмостойкости и каждый конструктивный прием решает несколько проблем, поэтому часто трудно выделить чисто антисейсмические мероприятия. Из каких соображений делается тот или иной конструктивный прием? Из соображения сейсмостойкости или из каких-либо других? Вот простейший пример. В Древней Греции было выработано несколько ордерных систем. Ордер — это порядок, в котором следует располагать элементы конструкции, учитывая пропорции и форму, жестко предписанные данным орденом. Более ранний, дорический. Он отличался массивностью, строгостью пропорции. В дальнейшем был разработан еще ионический ордер, более изящный, вычурный, с колоннами стройными и более легкими. Я думаю, что не только из соображений эстетики и красоты архитектуры исходили древние зодчие, видимо, они учитывали и принципы сейсмостойкости сооружений.

Если смотреть на фасад греческого храма, окруженного со всех сторон колоннами, то будет казаться, что все колонны имеют одну и ту же толщину, стоят вертикально на одинаковом расстоянии друг от друга [13]. На самом деле все не так. Такая регулярность восприятия получена за счет исправления оптического искажения. Крайние колонны сделаны толще других, расстояние от них до ближайших колонн уменьшено, наконец, они наклонены внутрь.

Что здесь: борьба с оптическим искажением или антисейсмическое мероприятие? С точки зрения сейсмоки сделано все правильно, так как при землетрясении нагрузки на угловые колонны будут больше, поэтому их надо делать толще. То же самое с угловыми балками, пролет которых специально надо уменьшать, так как нагрузка на них больше. Наконец, наклоненные внутрь колонны увеличивают общую устойчивость сооружения.

Думаю, что все вопросы архитектуры и строительства древние зодчие решали в комплексе. Здесь сочетается все: и эстетика, и сейсмостойкость, и многое другое, о чем мы, может, и не догадываемся.

### ХРАМЫ... ХРАМЫ...

Рассмотрим несколько греческих храмов. Начнем с Эрехтейона — двойного храма, дошедшего до нашего времени в развалинах, расположенного на афинском Акрополе и посвященного сразу двум божествам — Афине и Посейдону, колебателю земли. Окончательно этот храм был разрушен землетрясением 1852 г., а в начале нашего века тщательно реставрирован [8]. От всех остальных греческих храмов он отличается своей полнейшей асимметрией. Он состоит из прямоугольного здания и трех портиков, связанных с ним, имеющих различную жесткость и различную глубину заложения фундаментов (рис. 18). Грунты под этим сооружением неоднородные, храм стоит близко к обрыву, что усложняет волновую картину сейсмического воздействия. Кроме того, он частично опирается на фундаменты древнего храма Гекатомпедона, разрушенного во времена персидских войн. Ни о какой симметрии и равномерном распределении масс и жесткостей здесь говорить не приходится. Почему так произошло? Допустить, что древние строители, начавшие проектировать и строить Эрехтейон в 421 г. до н.э., не знали о требовании симметрии, мы не можем. Оказывается, что такой сложный асимметричный храм пришлось построить, чтобы удовлетворить трудно совместимым исходным требованиям. Эрехтейон должен был включить святилище Афины, где хранилась древнейшая на Акрополе святыня — деревянная статуя Афины, по преданию, упавшая с неба; святилище Посейдона с местом его удара трезубцем, откуда вытекал соленый источник, режим его нарушать было нельзя; святилище с древним оливковым деревом, выращенным Афиной для своего города; клетку священного змея и могилу Кекропса — "древнего человека". Все это надо было связать единым архитектурным обликом, а так как все святилища были расположены на разных ритуально-неприкосновенных уровнях скалы, то и пришлось построить такое сложное с точки зрения компоновки сооружение. Кстати, есть гипотеза, что этот храм недостроен, тогда он был бы еще сложнее.

Таким образом, строители Эрехтейона были вынуждены нарушить в силу чрезвычайных обстоятельств основные принципы сейсмостойкого строительства — симметрию и равномерное распределение масс и жесткостей. Остальные конструктивные приемы, направленные на обеспечение сейсмостойкости зданий, применявшиеся тогда, были ими использованы.

Прежде всего отметим, что при застройки плоскогорья афинского

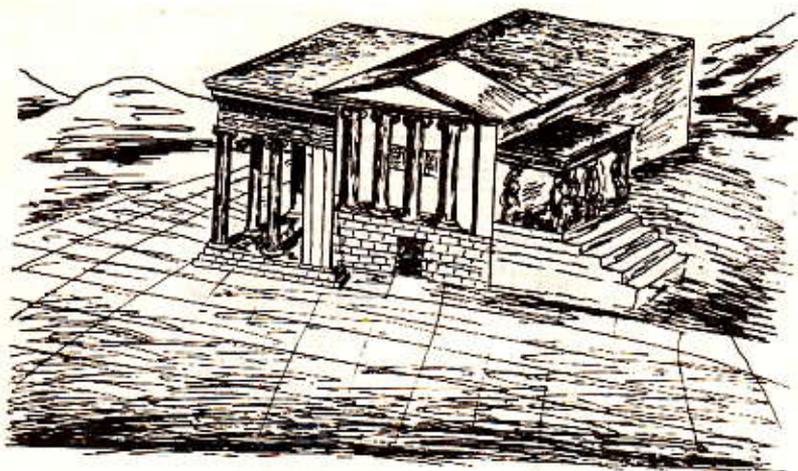


Рис. 18. Общий вид Эрехтейона

Акрополя строителям приходилось считаться с неровным характером поверхности скалы. Все сооружения, построенные на афинской скале — и Парфенон, и Пропилеи, и, конечно, Эрехтейон, изолированы от непосредственного соприкосновения с ней с помощью насыпных уплотненных грунтов, что обеспечило этим сооружениям однородность грунтового основания. Каменный фундамент Эрехтейона не представляет сплошного массива, имеются индивидуальные фундаменты под стенами и колоннами. При этом наиболее обширные и высокие фундаменты находятся под восточным и южным портиками, где скала имеет резкое понижение и соответственно имеется опасность сползания сооружения. Основным антисейсмическим мероприятием в Эрехтейоне является каменная кладка, состоящая из тщательно пригнанных блоков, уложенных насухо с перевязкой швов и соединенных Т-образными скобами и пиронами, залитыми свинцом (рис. 19) [13]. Для того чтобы не было скольжения при землетрясении, горизонтальные поверхности блоков сделаны шероховатыми, а для точности пригонки блоков по краям они имеют гладкие полоски. Точно так же обработаны вертикальные поверхности, что обеспечивает кладке высокий коэффициент трения. Блоки-плиты трехступенчатого стереобата (основание под колонны и стены) и цоколя, уложенные друг на друга, образуют нижнюю обвязку храма, которая имеет замкнутый контур. В основании стена сложена из больших блоков высотой до 1 м, длиной до 1,3 м при толщине 0,65 м. Выше в стене идут продолговатые мраморные блоки, уложенные в один ряд и связанные скобами и пиронами (см. рис. 19).

В планировке Эрехтейона учтено, что его западная часть (см. рис. 18) тяжелее восточной, и поэтому пристроенные с двух сторон к западной части портик Кориатид и северный портик служат как бы контрфорсами, удерживая эту тяжелую часть храма в случае землетрясения. Некоторые

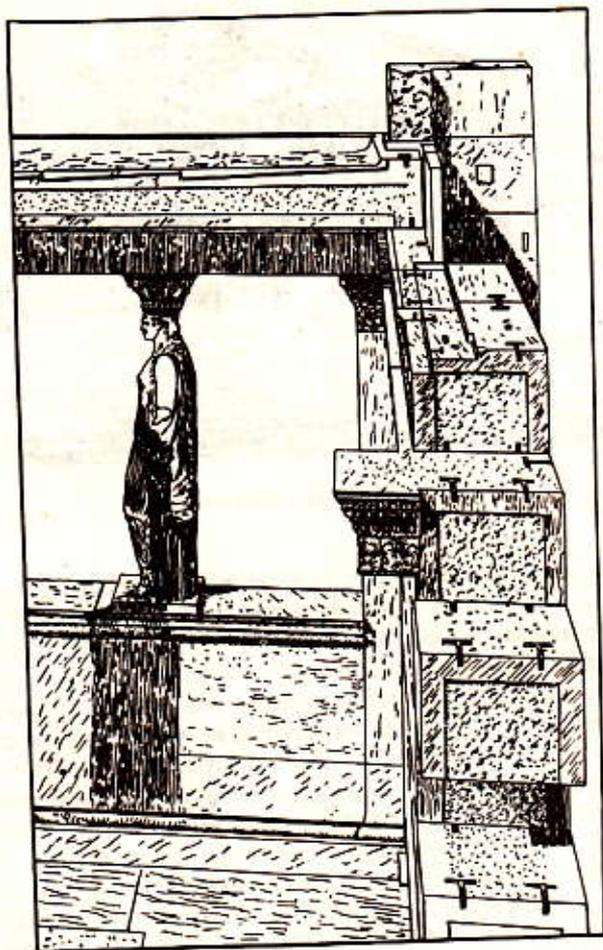


Рис. 19. Пространственная связь каменных блоков Эрехтейона с помощью металлических скоб

исследователи отмечают, что западная стена по своим качествам хуже других стен Эрехтейона [8].

Эрехтейон рассмотрен для того, чтобы показать ту полную асимметрию, которая воплощена в конструкции данного храма. Даже пристроенные портики (северный и южный Кориатид), которые, кроме эстетического и культового назначения, служат контрфорсами, не имеют общей оси симметрии, что, естественно, вызывало при землетрясении дополнительные крутящие моменты в конструкции храма. Данный пример показывает, что нельзя строить асимметричные здания в сейсмически опасных районах. Обсуждать конструкцию перекрытия Эрехтейона не будем. Она такая же, как у остальных греческих храмов, деревянно-каменная.

Перекрытие, типичное для греческих храмов, рассмотрим на каком-нибудь другом примере.

Рассказывая о греческих храмах, совершенно невозможно не рассмотреть Парфенон — одно из самых совершенных произведений мирового зодчества. Построенные на афинской скале в архаическую эпоху, храмы и общественные здания были разрушены персами в 480–479 гг. до н.э. После их изгнания, при легендарном Перикле, возглавившем рабочую демократию в период ее расцвета, началось восстановление Акрополя. Широко задуманная реконструкция проводилась под руководством Фидия, гениальной скульптора и архитектора того времени. Важнейшие памятники ансамбля Акрополя: Парфенон — главный храм Афины Девы, построенный в 447–432 гг. до н.э.; Пропилеи — парадные ворота, возведенные в 437–432 гг. до н.э.; гигантская статуя Афины Воительницы и, наконец, Эрехтейон, о котором уже было рассказано.

А.С. Башкиров даёт такую характеристику качеству работ этого храма: "Строительная техника Парфенона отличается поразительной тщательностью и превосходной чистотой в деталях, обработка каждого отдельного блока проведена с изумительной точностью. Каждый блок кладки, где бы он ни находился, говорит о том, что его отделка дана не только ради изящества, а ради железной необходимости способствовать конструктивной устойчивости сооружения. ...Равномерное и четкое распределение масс всего сооружения при стройности вертикалей придает зданию легкость и твердую уверенность в устойчивости" [8]. Профессор А.С. Башкиров очень много сделал для истории сейсмостойкого строительства. Его труды по археологии Северного Причерноморья начали публиковаться еще до 1917 г. Основным является уникальный четырехтомник "Антисейсизм древней архитектуры", который выходил в 1945–1948 гг.

Как уже говорилось, подготовке грунтового основания греческие строители придавали огромное значение. Еще до разрушения построек Акрополя персами в 480 г. до н.э. там были начаты подготовительные работы по строительству большого храма.

Грунтовое основание под фундамент этого храма было организовано в мощной плотно утрамбованной насыпи, куда позднее вошел и так называемый "персидский мусор", остатки разрушенных персами зданий. Гигантская подпорная стена удерживала насыпь, образовавшую территорию, которая была значительно шире, чем требовалось для храма. В этой насыпи и был заложен фундамент. Строительство шло медленно, и при Перикле храм заново перепланировался. Парфенон возводился в совершенно иных пропорциях. Новые зодчие укоротили Парфенон по сравнению со старым храмом, но сделали его шире. При этом они частично использовали старый укрепленный фундамент, сдвинув все сооружение дальше от края скалы. Оставшаяся незагруженной часть старого фундамента со стороны подпорной стенки служит как бы контрфорсом для основания нового сооружения. Строители не рискнули поставить Парфенон хотя бы частично прямо на скалу, что вызвало бы неоднородность грунтового основания. Они постарались избежать и узкого ребра скалы, идущего с

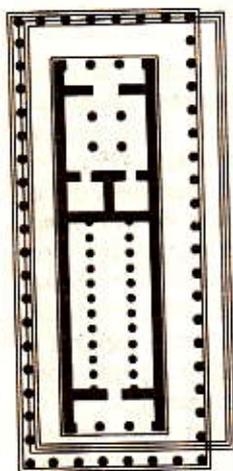


Рис. 20. План Парфенона

запада на восток параллельно длинной стороне храма. Посадка его на это ребро грозила бы разломить храм во время землетрясения. Эти условия грунтового основания, требование сочетаться с ландшафтом и господствовать над местностью определяли положение Парфенона.

На рис. 20 показан план Парфенона [11], который представляет собой периптер (прямоугольное здание, с четырех сторон обрамленное колоннадой) с числом колонн  $8 \times 17$  и размерами основания примерно  $31 \times 69,5$  м. Внешняя колоннада окружает стены внутреннего помещения, так называемой целлы, с размерами в плане  $21,7 \times 59$  м [8]. Колонны имеют высоту 10,43 м при диаметре в нижней части 1,905 м, диаметр угловых колонн составляет

1,948 м. Размеры храма приведены для того, чтобы подчеркнуть пропорциональное соотношение ширины, высоты и длины.

Как видно из плана Парфенона, имеются еще внутренние колонны и поперечные стены, что обеспечивает равномерное распределение масс и жесткостей по всему сооружению.

Существующие повреждения Парфенона говорят о том, что он перенес большое количество землетрясений и, по-видимому, сохранился бы в целости до наших дней, если бы не взрыв от пушечной бомбы порохового склада в 1687 г., который был устроен в нем турками. Этот взрыв вырвал центр здания и разбросал колонны продольных фасадов. То, что Парфенон находится в развалинах, позволяет в деталях изучить те малые конструктивные приемы сейсмостойкого строительства, которые применяли древние греки.

Основные строительные материалы Парфенона — мрамор, бронза в штырях и пилонах, свинец для их заливки. Сочетание из этих материалов позволяет создавать сейсмостойкие конструкции. Чтобы не было свободного проскальзывания одной каменной детали по другой, во-первых, устраивается специально повышенная шероховатость их постелей, даже в барабанах колонн видна резкая, нарочитая шероховатость, во-вторых, ни один блок кладки в фундаменте, в стене, в балках перекрытия, даже в блоках наличников дверей не устраивается без употребления пионов и штырей, которые заменяли раствор и обеспечивали податливую связь между элементами конструкции. В упавших барабанах колонн видны квадратные отверстия, куда вставлялись деревянные штыри с муфтами [11].

Такая составная колонна была, конечно, значительно более гибкой, чем монолитная. Больше того, составная колонна могла быть в некотором смысле сейсмоизолятором для верхнего тяжелого перекрытия, так как она не передавала на него всего движения грунта во время землетрясения. Но, к сожалению, колонны уже не могли работать как чисто

сейсмоизоляторы, потому что они были связаны балками в верхнем уровне в единое целое с более жесткими стенами. В результате горизонтальные сейсмические нагрузки, возникавшие от большого веса перекрытия, почти целиком передавались на более жесткие стены целлы и разрушали их в первую очередь, а составные колонны в силу своей гибкости получали эти горизонтальные нагрузки частично до тех пор, пока были целыми жесткие стены. Недаром в развалинах греческих храмов можно увидеть фрагменты, состоящие из группы колонн с лежащими на них массивными балками-архитравами, стен же нет, они рухнули. А вот система только на колоннах получалась сейсмостойкой.

Теперь о каменных балках, работающих на изгиб. Боясь разрушения каменных несущих балок, уложенных на внешние колонны, строители Парфенона свели до минимума (2,47–2,51 м) расстояние между ними [8]. При этом для облегчения монтажа и повышения надежности этих балок их делали составными из трех плит, поставленных на ребро. В этом случае разрушение одной плиты не вело к полному обрушению всей несущей конструкции. Любопытно отметить, что в более древних храмах балки составлялись из нескольких плит, уложенных плашмя, что снижало их прочность. Потом стали устанавливать плиты на ребро, как в Парфеноне.

В некоторых греческих храмах, для того чтобы избежать соударения плит, составляющих балку, устраивались зазоры между ними. На стены и массивные балки опирались остальные элементы дорического ордера, имеющие внушительные размеры, и кровля Парфенона, построенная из деревянных стропил с обрешеткой и уложенной на них тяжелой мраморной черепицей. Можно назвать и другие антисейсмические приемы, применявшиеся в греческих храмах. Например, в том же Парфеноне существовали двухъярусные внутренние колонны, имевшие балочную связь чуть выше середины их общей высоты, что обеспечивало им повышенную устойчивость. Но в общем-то все эти конструктивные ухищрения, направленные на повышение сейсмостойкости греческих сооружений, часто оказывались бесполезными по сравнению с отрицательным влиянием большого веса, сосредоточенного в уровне перекрытий. Этот огромный вес и нес разрушение греческим храмам. Сам Парфенон, судя по повреждениям его отдельных деталей, перенес много землетрясений. Происходили многократные соударения каменных блоков между собой, появлялись отколы в элементах вдоль вертикальных швов и трещины в плитах пола.

Известно, что многие греческие храмы разрушили землетрясения. В каком состоянии выстоял бы до наших дней сам Парфенон — это идеальное воплощение греческого строительного искусства — трудно сказать. Интересно, что часть колонн Парфенона с лежащими на них элементами конструкций стоит, несмотря ни на что. Очень часто стоят колонны, составленные из отдельных барабанов. Почему? Может быть, отдельные группы колонн представляют такую гибкую конструкцию, что не резонируют с сейсмическим воздействием. Или все-таки колонна из барабанов, соединенных трением и податливыми шипами, является сейсмоизолятором. Проявить себя колонне мешает ее связь с более жесткой централь-

ной конструкцией, так называемой целлой. Как только эта связь в результате разрушений выключается, изолированные ряды колонн делают сейсмостойкими. Эти рассуждения можно было бы проверить, если бы существовал хоть один греческий храм, состоящий из одних колонн.

Итак, с точки зрения наших принципов сейсмостойкости в греческих храмах имеется два недостатка: большие высоко расположенные веса и неоднородная жесткость конструкции.

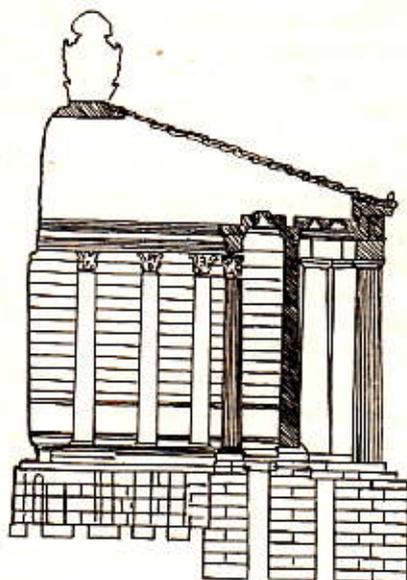
Познакомившись со стандартными антисейсмическими приемами древних греков, давайте поищем случаи, когда им приходилось искать нестандартные решения (как это было с Эрехтейоном).

Наиболее распространенной формой греческих храмов были прямоугольные периптеры. Наряду с ними в меньшем количестве существовали круглые периптеры и другие сооружения. Из гомеровского эпоса мы знаем, что во дворе у Одиссея стоял фолос (круглый дом). На Пелопоннесе в ансамбль святилища Асклепия также входил фолос, построенный Поликлетом Младшим в 360–330 гг. до н.э. Это круглое в плане здание диаметром около 29 м было окружено снаружи 26 колоннами дорического ордера и имело внутри 14 колонн коринфского ордера (рис. 21) [11]. Назначение этого здания не выяснено. С точки зрения сейсмостойкости планировка его более совершенна, чем планировка прямоугольного сооружения. Для него характерна идеальная симметрия. Фундаменты представляют собой глубокозаложенные замкнутые кольца, отдельные под внешние колонны, под стены и под внутренние колонны. Под центральным полом имеется ряд концентрических стен, сохранившихся от более древней постройки. При этом фундаменты внешних колонн и стены имеют общую обвязку по верху. В результате здание разбито как бы на два независимо деформирующихся кольца. Внутреннее, состоящее из внутренней колоннады, обвязанной балкой сверху и фундаментом снизу, и внешнее, состоящее из стены и внешней колоннады, также обвязанных сверху и снизу. Каменные плиты, уложенные на стену, внутреннюю и внешнюю колоннады, имеют отверстия (кессоны), которые значительно облегчают их. По предположениям, кровля также была легкой деревянной или вообще ее не было. До наших дней это здание не сохранилось, и я не нашел данных о том, что его разрушило. Но с точки зрения сейсмостойкого строительства того времени оно практически лишено недостатков.

Интересно, что уже при строительстве древнейших храмов греки понимали важность прочного основания под ними. На Пелопоннесе, в Олимпии в VIII в. до н.э. был построен храм Геры (Герейон). Этот храм возводился на плохих грунтах, образовавшихся в результате намыва горной рекой. В результате коренной грунт залегал глубоко, а поверхностные слои почвы были глинистыми пльвунами с близким залеганием к поверхности уровня грунтовых вод. Кроме того, было известно, что эти места отличались часто повторявшимися землетрясениями [8]. Герейон был поставлен на специальную искусственную платформу, построенную из часто забитых свай, пространство между которыми было забито щебнем и речной галькой. На эту площадку были уложены каменные плиты

Рис. 21. Раздельные фундаменты храма Фимелы в Эпидавре, IV в. до н.э.

цоколя храма, а уже на этих плитах были возведены стены храма из сырцового кирпича с деревянным каркасом. Колонны, балки и несущие части кровли были первоначально построены из дерева. Крыша была покрыта глиняной черепицей. Несмотря на недолговечный материал, из которого был построен Гереон, этот храм простоял более тысячи лет, до IV в., благодаря частым и заботливым ремонтам с заменой деревянных колонн на каменные.



А вот другой храм IV в. до н.э., построенный в честь Афины на Пелопоннесе, в столице области Аркадии — Тегее, был разрушен

из-за несоблюдения строительных антисейсмических приемов. Его фундаменты были заложены в слабых аллювиальных отложениях чрезвычайно неглубоко и целиком сразу под весь храм без усиления тех мест, где передавались большие вертикальные нагрузки. При этом только часть камней имела между собой соединение металлическими скрепами, поэтому швы кладки всюду разошлись из-за скольжения блоков во время землетрясения. При разрушении упала верхняя часть здания, оставив глубокие впадины в каменном полу. Тут явно строители не использовали богатое наследие строительных антисейсмических приемов [8].

Более 23 столетий прошло со времени построения Эпидаврского театра, но до сих пор он приводит в изумление своей сохранностью, несмотря на то что эту конструкцию подстилают мягкие грунты. Расположен театр в ложе, вырытом на склоне холма, район отличается высокой сейсмичностью. Конструкция этого сооружения, довольно плоская и протяженная, в плане имеет форму, немного большую половины круга. До сих пор в основании нет провалов, связанных с осадкой грунта или выпучиванием, вызванных оползнями при землетрясениях: Все это объясняется продуманностью и тщательным выполнением конструкции, антисейсмических мероприятий здесь проведено более чем достаточно. Прежде всего зрительный зал имеет общую обвязку со всех сторон. По внешней окружности это крепкая стена, а вдоль боковых стен зрительного зала устроены мощные подпорные стенки. Тщательно подготовлено грунтовое основание под всю конструкцию театра. Массивные блоки кладки соединены горизонтальными и вертикальными скобами и штырями. И даже хорошо организованные водостоки и ливневспуски способствуют сейсмостойкости всей конструкции театра [8].

Наша задача заключается в том, чтобы показать те конструктивные мероприятия, которые были призваны обеспечить сейсмостойкость древнегреческим сооружениям. Давайте назовем эти мероприятия, пользуясь тем ограниченным количеством примеров, которые приведены выше.

Прежде всего антисейсмическим мероприятием надо считать то, что древние греки в наземных сооружениях применяли только стоечно-балочную конструкцию (отказавшись от всякого рода элементов типа арок и куполов, создающих распор и утяжеляющих всю конструкцию).

В подавляющем числе случаев греческие храмы имеют симметричное расположение масс в соответствии с их геометрической симметрией. Они либо прямоугольные, либо круглые.

Характерны антисейсмические пояса в нижнем и верхнем уровнях. Нижняя обвязка представляет собой стилобат из крупных блоков твердого камня, связанных металлическими скрепами. На стилобат непосредственно опираются колонны. Верхняя обвязка, можно сказать, двойная, она выполнена в виде связанных скобами архитравов, балок, опирающихся на колонны, и элементов карниза в уровне кровли.

Вся конструкция состоит из отдельных тщательно пригнанных каменных блоков, соединенных металлическими скобами и штырями, залитыми свинцом. Соприкасающиеся поверхности блоков тщательно обработаны, для того чтобы обеспечить повышенное трение. Тщательная пригонка блоков придает всей кладке повышенную прочность, предотвращает местные концентрации напряжений и соответственно разрушения, а повышенное трение между каменными блоками снижает амплитуду колебания всего сооружения. О роли металлических скреп, залитых свинцом, уже говорилось.

Ко всему этому надо добавить тщательное уплотнение грунтового основания и устройство фундаментов под отдельно стоящие элементы.

Можно назвать и другие антисейсмические мероприятия: усиление углов зданий, придание для устойчивости колоннам легкого наклона внутрь и т.д. Но уже из сказанного ясно, что древние греки чрезвычайно серьезно относились к сейсмической опасности и учитывали основные законы сейсмостойкости.

Теперь давайте побываем в некоторых греческих колониях, где иногда очень удачно сочетались местные строительные приемы и греческие традиции. Обратим внимание на причерноморские греческие города, часть из которых теперь находится на территории нашей страны.

#### ДРЕВНЕЕ ПРИЧЕРНОМОРЬЕ

Отправимся на Восток по следам греческих переселенцев-колонистов. Рассмотрим несколько выдающихся памятников архитектуры того времени. Здесь можно наблюдать сочетание греческих и восточных архитектурных форм, что в некоторых случаях дает великолепные результаты, создаются сооружения, удачно сочетающие эстетическую и кон-

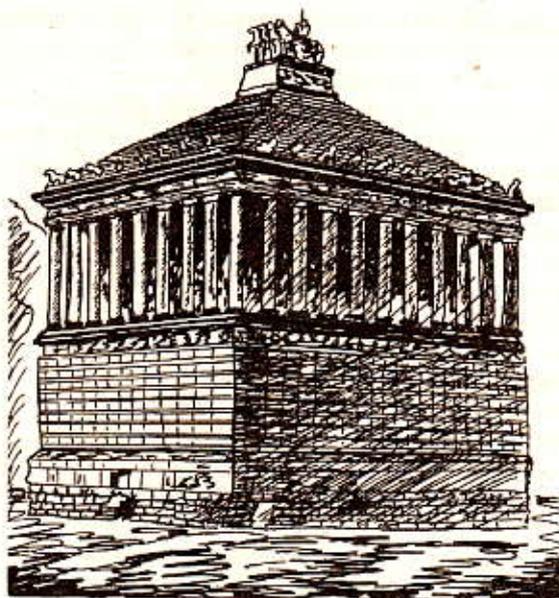


Рис. 22. Нагромождение стилей в Галикарнасском Мавзолее



Рис. 23. Пирамидальная платформа гробницы Кира

структивную сторону. Начнем с примера неудачного, с точки зрения сейсмостойкости сконструированного сооружения.

В середине IV в. до н.э. в Галикарнасе в Малой Азии был построен мавзолей в память царя Мавзола. Архитекторы, стараясь создать что-то выдающееся, отошли от типовых греческих форм и создали следующее комбинированное сооружение (рис. 22). Цоколь мавзолея представлял продолжение глубокозаложенного в почву фундамента, далее шел чрезвычайно высокий стилобат, на котором был поставлен периптер с колоннами  $9 \times 11$ . Вот этот высоко поднятый периптер был перекрыт мелко-

ступенчатой пирамидой, на вершине которой стояла греческая квадрига, управляемая Мавзолом и его женой Артемизией.

По своей компановке мавзолеей очень напоминает гробницу иранского царя Кира, построенную в VI в. до н.э. (рис. 23). Прямоугольная в плане небольшая погребальная камера была поднята на платформу — постамент. Все элементы этой усыпальницы сложены из крупных блоков известняка. Пирамидальной формы постамент, состоящий из шести ступеней с переменной высотой (маленькие вверху, большие внизу), обеспечил этой гробнице прочность, долговечность и устойчивость против землетрясений на более чем 25 столетий. Если мы проверим принципы сейсмостойкости на гробнице царя Кира, то окажется, что все они выполнены: симметрия, низко расположенный центр тяжести, разумные размеры, общая высота не превышает 11 м, разве что нет облегчения веса. Кстати, эта гробница, в свою очередь, повторяла архитектурные формы древнеиранского святилища [6].

В Галикарнасском мавзолее принципы сейсмостойкости нарушены. Во-первых, это большие размеры, не зря он отнесен к семи чудесам света. Во-вторых, и это главное, сооружение было чрезвычайно тяжелым, соответственно цоколь с глубоко заложённым фундаментом был перегружен, а хрупкие колоннады периптера и стены целлы не в состоянии были удержать при сейсмических воздействиях вознесённое в поднебесье тяжелое пирамидообразное тело перекрытия. Археологические исследования свидетельствуют о том, что мавзолеей был разрушен от землетрясения [8].

Отправимся теперь из Малой Азии сразу в Северное Причерноморье. Начнем с Боспорского царства со столицей Пантикапеей (ныне Керчь). История античных государств — Ольвии, Херсонеса, Боспора охватывает период VI в. до н.э. — IV в. н.э. Существует аналогия между ступенчатой конструкцией перекрытия Галикарнасского мавзолея и подобными же перекрытиями у склепов Боспорского царства. Только схожесть эта чисто внешняя, между ними есть одна существенная разница. Если в первом массивное пирамидально-ступенчатое перекрытие было расположено на большой высоте, то во втором вся конструкция находится в грунте и обжата насыпанным над ней курганом.

Рассмотрим для примера два курганных склепа: Мелек-Чесменский и Царский, сооружённые в IV в. до н.э. и существующие поныне. Первый находится прямо в центре города Керчи у автовокзала, второй — в пригороде. Летом 1989 г. я был приглашён участвовать в экспедиции, возглавляемой А.А. Никоновым, по древним городам Крыма в поисках следов ископаемых землетрясений, в том числе и тех, что упоминаются в исторических документах. Такие исследования нужны были для определения расчётной сейсмичности различных районов Крыма, главным образом для района строительства Крымской атомной станции на Керченском полуострове. Следы древних сильных землетрясений на Керченском полуострове были найдены. Склепы, о которых мы сейчас говорим, за свою более чем двухтысячелетнюю историю пережили несколько сейсмических катастроф. Эти катастрофы оставили на них свои следы, но существенных повреждений для всей конструкции они не нанесли.

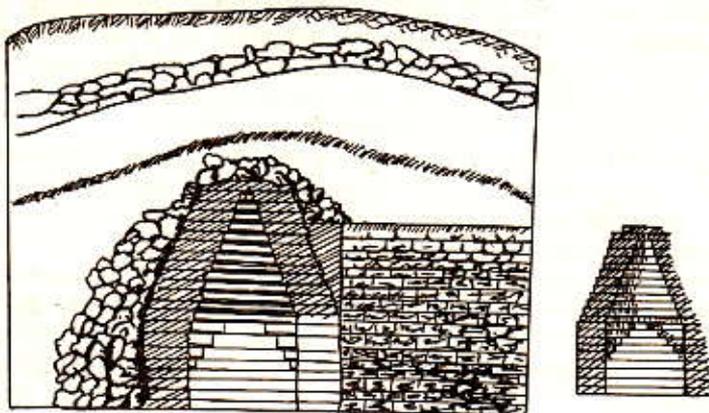


Рис. 24. Слоистость Царского кургана

На рис. 24 показан продольный разрез Царского кургана и поперечный разрез входа в склеп [15]. Царским этот курган назван за свою громадную величину и за свою совершенно уникальную каменную конструкцию. Аналогов ему нет нигде в мире, разве что подземные купольные гробницы Микен. Склеп состоит из камеры и длинного высокого коридора, дромоса, прорезающего толщу насыпного грунта и выходящего к основанию кургана. Стены камеры образуют в плане квадрат  $4,43 \times 4,4$  м. Они сложены из огромных блоков известняка, составляющих четыре ряда. Блоки хорошо отесаны с лицевой стороны и плотно пригнаны друг к другу насухо. С пятого ряда кладки начинается купольное перекрытие по системе "ложного свода". Начиная с углов выдвигаются выступы массивных блоков, которые, надвигаясь из ряда в ряд все больше, суживают пространство над квадратным планом камеры, образуя пять рядами правильные многоугольники, которые выше переходят в круг. Еще 12 рядов дают математически точные суживающиеся друг над другом круги, создавая конический купол. Последний верхний круг закрыт сверху одной массивной плитой. Интересно и надежно решена здесь проблема сопряжения нижней квадратной части и круглого купольного перекрытия посредством уступчатых парусов, которые плавно переходят к нависающим друг над другом кругам кладки купола. Высота камеры равна 9 м. Кольца конического купола собраны из длинных камней криволинейного очертания.

С южной стороны к камере примыкает дромос длиной 36 м, шириной 2,5 м и высотой до 7 м. Он также сложен насухо из гигантских камней известняка, тщательно пригнанных и образующих уступчатый узкий свод, как показано на рис. 24. И камера и дромос с наружной стороны завалены крупным необработанным камнем в шесть-семь рядов у подошвы и в три-четыре ряда над куполом (см. рис. 24). Довольно не просто устроена земляная насыпь кургана: первый слой насыпи едва покрывает купол камеры и дромос вместе с каменным завалом, далее вся насыпь обложе-

на толстым слоем морской травы и водорослей; второй слой насыпи кургана толщиной в несколько метров покрыт в три ряда слоем рваного камня, образуя как бы каменный курган; третий слой земляной насыпи завершает конструкцию кургана. Вся насыпь над склепом была больше 17 м, окружность основания кургана составляет 250 м.

Нет сомнений, что весь многослойный массив кургана с ядром в виде каменного склепа необходимо рассматривать работающими как единое целое и воплощающими передовую творческую архитектурно-строительную мысль того времени.

Основное антисейсмическое мероприятие самого склепа заключается в тщательной пригонке почти циклопических блоков камня. Их соприкасающиеся поверхности специально сделаны повышенной шероховатости, что обеспечивает надежное сцепление между блоками из известняка. Другое важное антисейсмическое мероприятие — это борьба с распором от купола и сводчатого перекрытия дромоса. Силы распора прежде всего воспринимаются замкнутым контуром стен склепа, а существующая засыпка камнем и грунтом создает дополнительное обжатие всего склепа.

Конструктивно совершенно решена задача плавного перехода круглого в плане конического купола в квадрат камеры. Когда смотришь на эту конструкцию, она производит впечатление уверенности, надежности и прочности. Для того, дохристианского времени, решение задачи о сопряжении купольного перекрытия и самого здания прямоугольной формы было делом далекого будущего. Поражают единство архитектурной задачи и конструктивного воплощения, логичность замысла всей конструкции, ее совершенство, точность мышления человека, придумавшего и создавшего это произведение зодчества. Для истории этот курган так же интересен, как египетские пирамиды и индийские храмы.

С конструкцией многослойности насыпного кургана многое непонятно. Верхний мягкий слой, под ним каменный панцирь, дальше мягкий слой грунта, упругий амортизатор из травы, опять мягкий грунт, опять каменная броня и, наконец, чрезвычайно прочный сам склеп. Почему так делали древние строители? Сверху, кроме дождя и ветра, этим курганам ничто не грозило. А вот снизу? Землетресения, разумеется, были возможны в этом месте, и они были. Но думали ли об этом древние строители? Зачем укладывали этот толстый слой морской травы? Об этом слое в причерноморских греческих сооружениях я слышал давно и думал, что морская трава должна сгнить. Наконец, я сам увидел эти прокладки из морской травы. Оказывается, их укладывали греки и их последователи в перекрытиях почти всех зданий. Эти слои морской травы обладают редкой долговечностью, гораздо большей, чем дерево. Такой упругий слой образует поверхность скольжения. Но зачем он был нужен? Никто, в том числе очень квалифицированные археологи, не мог мне объяснить. Опять же зачем слой камней в кургане? О чем бы не думали и как бы ни проектировали этот курган древние строители, конечный результат известен — создано сейсмостойкое сооружение, что подтвердила практика его существования до современности.

Примерно такая же конструкция Мелек-Чесменского кургана, только

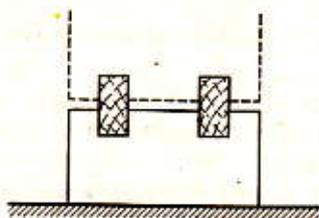


Рис. 25. Сейсмоизоляция храма, Пантикапей

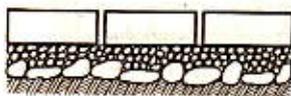


Рис. 26. Сейсмоизоляция фундаментных блоков

он меньше и купол у него не конический, а прямоугольный ступенчатый, как у мавзолея в Галикарнасе.

Если с набережной в городе Керчь по красивой лестнице, украшенной химерами, подняться на гору Митридат, то, обогнув ее вершину, вы увидите раскопки Пантикапей. Следы древних стен, башен, резервуаров, водопровода, и в том числе недавно раскопанные, довольно массивные фундаментные блоки небольшого античного храма. В этих блоках по всему периметру устроены два паза прямоугольной формы (рис. 25). Эти пазы явно были устроены для закладки деревянных брусьев между стеной и фундаментом. Назначение таких брусьев можно истолковать однозначно — это сейсмоизоляторы, смягчающие удар от фундамента на стены при землетрясении. То, что этот город в свое время сильно пострадал от землетрясения, видно по упавшим в одну сторону стенам зданий и по той сдвиговой трещине, что пересекает весь город.

В Пантикапее при ее застройке основательными сооружениями строители столкнулись со сложными грунтовыми условиями. Строить надо было на склонах горы, сложенной слоистыми песчаниковыми породами, легко поддающимися осадкам и сдвигам. Фундаменты были устроены следующим образом. Сначала уложен был слой гравийного песка. На него были поставлены на ребро тщательно пригнанные известняковые квадраты первого ряда. Второй ряд таких же квадратов был уложен на первый ряд, но уже плоскостью, как говорят, на постель. Третий и четвертый ряды каменных блоков лежат уже на прокладке из мелких камней [15]. Первый ряд лежит на ребре, для того чтобы эти блоки лучше воспринимали изгибающие моменты, которые возникают в них от неравномерных осадок или при распространении сейсмических волн. Мелкие камни в швах между блоками способствуют равномерному распределению нагрузки между блоками фундаментов, а также позволяют блокам при землетрясении проскальзывать друг относительно друга, что, конечно, снижает сейсмическую нагрузку. Не здесь ли была заложена идея, которая через каких-нибудь пару с лишним тысяч лет привела к созданию современных систем сейсмозащиты, состоящих из чугунных шаров или эллипсоидов вращения.

На берегу засоленного залива Азовского моря в местечке, называемом Чокрак, совсем недавно раскопаны фундаменты огромного здания, которое могло быть и храмом. На развалинах этого здания имеются

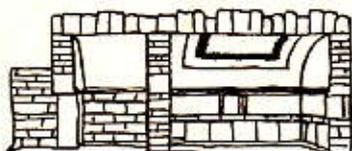
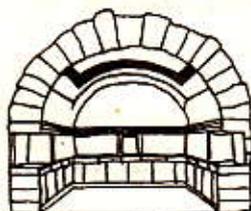


Рис. 27. Склеп с двойными связями



следы пожара III в. до н.э., когда по историческим данным в этом месте было сильное землетрясение. Мне довелось самому наблюдать как были уложены громадные фундаментные блоки, в раскопе это было хорошо видно (рис. 26). Внизу лежит толстый слой глины, потом идут необработанные камни средней крупности, далее насыпан выровненный слой мелких камней, а на него уже уложены фундаментные блоки. Назначение такой конструкции понятно — равномерно рас-

пределить и снизить сейсмические силы за счет проскальзывания сооружения по слою глины.

Надо сказать, что в греческих колониях уже не сохранялись в первоначальном виде те строительные приемы, которые существовали в коренной Греции. В них уже сказывалось влияние Востока. Например, в вышеописанном фундаменте применялся известковый раствор. Зато кладка каменных блоков насухо с применением для их соединения скоб и штырей с заливкой их потом свинцом встречается чрезвычайно редко. Хотя встречаются совершенно феноменальные примеры того, что классическая строительная техника греков была известна в тех местах.

В 1868 г. на Таманском полуострове на Васюнкинской горе в самом большом кургане был открыт склеп, который назвали Большим [15]. В конструкции этого склепа удачно сочетаются почти все антисейсмические приемы того времени, которые были известны на Западе и на Востоке. Продольный и поперечный разрез этого склепа показан на рис. 27. По своей компоновке он состоит из двух помещений, прихожей и камеры. Интересно, что перекрытие устроено в виде цилиндрического свода, который не применяли греки, а клинчатые камни этого свода соединены чисто по греческому образцу железными громадными (это уже не по-гречески) скобами, залитыми свинцом. Три прочные поперечные каменные стены служат диафрагмами цилиндрическому своду. В стенах заложены длинные, связанные между собой камни, которые служат антисейсмическим поясом всему сооружению, стягивая его и воспринимая распор от свода. Размеры этого склепа умеренные: ширина составляет около 4 м, длина — около 6 м. Как видите, все симметрично; вес, правда, великоват, но все сооружение находится в кургане и обжато засыпкой из грунта. Во всяком случае, этот склеп простоял не менее 2 тысячелетий при всех подземных бурях.

Это были примеры удачных конструктивных решений, неудачные конструкции, разумеется, чаще всего не сохранились. Но известны и такие случаи. Оборонительная стена Херсонеса на отдельных участках несколько раз обрушивалась, по-видимому, от землетрясений. Это

объясняется тем, что в стене имеются пролеты до 100 м, не подкрепленные контрфорсами и башнями.

В Ольвии расположенной в северо-западной части Причерноморья, в качестве фундаментов под стены применялись слоистые субструкции из золы и глины. В зависимости от рельефа местности, грунтов и типа сооружения размеры этих субструкций менялись в очень широких пределах: ширина от 4 до 12 м и глубина от 0,25 до 5 м [15]. По сути дела, эти субструкции представляли собой искусственный камень, образовавшийся в результате того, что содержащиеся в золе соли пропитывали глину и создавался своего рода искусственный солончак, который служил прекрасным основанием для крепостных стен, башен и каменных зданий. Это искусственное основание часто использовалось при строительстве на слабых грунтах. Не известно только имели ли способность слоистые фундаменты, состоящие из глины и золы, проскальзывать друг относительно друга и за счет этого снижать сейсмические нагрузки. Во всяком случае, эти слоистые конструкции имеют переменную жесткость и соответственно в них будут рассеиваться сейсмические волны.

При строительстве укреплений Херсонеса широко применялось армирование каменной кладки деревом. Это мы уже встречали и не раз встретим в другое время у других народов. В кладке стен применялись бревна, видимо, чем-то пропитанные от гниения. Благодаря этому стены облегчались, становились гибкими и монолитными. Особенно интересна в этом отношении башня Зенона, в которой заложен деревянный каркас из вертикальных и горизонтальных брусьев.

Очень много миру дала греческая культура. Необходимо продолжить изучение архитектурных памятников Греции, донесших до нас следы подземных бурь. Это дает много полезного для современного сейсмостойкого строительства.

## РИМ И ВИЗАНТИЯ

### ВЕЧНЫЙ СОЮЗ БЕТОНА И АРКИ

История Рима условно делится на два крупных периода: 1) республиканский – от изгнания этрусских царей в 509 г. до н.э. до возникновения Римской империи в 27 г. до н.э.; 2) императорский – до перенесения столицы империи в греческую Византию императором Константином в конце IV в.

Характерной чертой римской государственной структуры, независимо от того была ли это республика или уже империя, является способность организовывать и управлять. Римское государство имело в своем распоряжении многочисленную армию солдат, которую могло использовать на общественных работах, и громадную массу рабов, способную выполнять огромные объемы самого тяжелого физического труда. Кроме того, в результате завоеваний в руках римского народа скапливались гигантские богатства, которыми можно оплачивать любые большие объемы работ и дорогие строительные материалы.

Вот на этой политико-экономической основе и формировалась римская строительная техника. Римляне почти отказались от добычи материалов, нужных для изготовления крупных деталей. Транспортировка и обработка таких деталей требовала специальных механизмов и квалифицированного труда каменщиков. Это могли себе позволить только греки, из которых почти каждый работник был мастером и художником. Правда, в исключительных случаях римляне возводили сооружения, подобные греческим, из крупных блоков камня, уложенного насухо и скрепленного штырями и скобами. Они знали, как это делается, так как при своих завоеваниях римляне умели присваивать себе не только богатства, но и знания. Обычно же они пользовались совсем иным методом. С помощью многочисленной армии неквалифицированных рабочих заготавливались огромные массы мелкого строительного материала, камней, кирпича, гальки, песка, извести. Далее, по указанию нескольких профессионалов и архитектора, возводилось само сооружение, выполнялись многочисленные однообразно повторявшиеся операции, укладывался кирпич облицовочных стен, пространство между ними заливалось бетоном и забрасывалось камнями, потом возводилась деревянная опалубка и лились из бетона купола. Готовая конструкция украшалась облицовкой из красивых материалов и декоративными колоннами. Вот такова собственно римская техника строительных работ.

Виолле ле Дюк [12] образно представил разницу между греческими и римскими сооружениями. Он говорит, что наружные формы греческих сооружений неотделимы от их конструкции, поэтому их можно сравнить с обнаженным человеческим телом, на котором видно предназначение каждой его части. Римское же здание напоминает человека, одетого в тогу, когда закрыты и задрапированы конструктивные части его тела.

Говоря о римском строительстве, невозможно не вспомнить о Витрувии, архитекторе I в. до н.э., написавшем трактат [16] "Десять книг об архитектуре", где даны рекомендации, как и что строить, как подбирать растворы, как делать фундаменты, как возводить оборонительные башни и как заряжать катапульту.

Можно сожалеть о том, что труд Витрувия не переиздавался у нас в стране много лет, его должен иметь каждый современный строитель. В этом трактате есть масса полезных советов. У римлян в строительстве наблюдалась строжайшая экономия, но строили они на вечные времена. Читая Витрувия, узнаешь массу интересных приемов, которые позволяли определять качество строительных материалов или выбирать для строительства грунтовое основание не хуже нас.

Зимой 1988/89 года мне довелось заниматься обследованием последствий армянского землетрясения. Я видел песок, часто загрязненный глиной или землей, пылеватый, а то и просто туфовый, который использовался там при строительстве. Также, собственно, подбирались и остальные компоненты армянского бетона. Результаты известны — элементы из этого бетона не просто разрушались, а рассыпались на мелкие кусочки.

Если же разрушались конструкции из прочного римского бетона, то они разваливались на отдельные крупные глыбы. Но римляне для своего бетона грязный песок никогда бы не использовали. Загрязненность песка

они проверяли просто: высыпали его на чистую белую тряпку, а потом стряхивали. Если на белом полотнище оставались следы, то такой песок уже не годился. Или вот выбор грунтового основания для сооружения. Мы в этом случае должны проводить прозвонивание грунта, возбуждая его колебания взрывами или ударами чугунного шара, а потом сравнивая записи колебаний различных грунтов. Римляне делали то же самое, только проще: ставили на землю чашу с водой и невдалеке бросали камень, если вода в чаше колебалась, то грунты плохие и здесь нельзя строить монументальные сооружения или необходимо удалить этот грунт и заменить его хорошим.



Рис. 28. Портик Эмилиев — воплощение регулярности

Итак, эпоха римской строительной техники характеризовалась двумя новыми элементами: 1) открытием нового вяжущего раствора и соответственно созданием вещества римского бетона; 2) применением сводчатых перекрытий в виде полусферы и цилиндра. Еще этруски применяли пуццолановый песок как связующее вещество при возведении сводов. Римский бетон получается из смеси вулканической пыли Везувия, известкового раствора и камней, при добавлении воды происходит химическая реакция, в результате получается очень водостойкий искусственный камень. Так началась новая эра в строительной технике, стало возможным создавать литые конструкции. В соответствии с престижем римского могущества необходимо было строить сооружения с большими пролетами перекрытий, а такие пролеты тогда можно было выполнять только с помощью куполов. Но делать купол сложной формы с криволинейными поверхностями из штучного материала довольно сложно, нужны квалифицированные рабочие, а вот отлить такие купола намного проще. Круг идей замкнулся: совпали государственное устройство и новые строительные материалы, появились римские специфические сооружения. Рассмотрев вопрос в принципе, займемся деталями.

Впервые соединение сводчато-арочного принципа конструкции с бетонной техникой в грандиозных масштабах было воплощено в портике Эмилиев в 174 г. до н.э. Это был попросту склад зерна в порту Эмпории на Тибре. Размер этого склада был 487х60 м и состоял он из 50 отдельных секций, каждая секция была перекрыта цилиндрическим сводом с пролетом 8,3 м [11] (рис. 28). Стены здания выполнены из бетона очень хорошего качества и облицованы камнем, из того же материала выполнены перекрытия. Портик Эмилиев знаменует появление типовых

конструкций из монолитного римского бетона. Сооружения из этого материала получаются прочными с однородными свойствами, а если выполненная конструкция симметрична и с регулярным распределением масс и жесткостей, то здание получается сейсмостойким.

Совершенно понятно, что конструкция из монолитного бетона будет обладать совсем другими свойствами, чем греческие храмы, выполненные из каменных блоков, соединенных податливыми связями. Римские сооружения будут абсолютно жесткими, а греческие довольно податливыми. Древние строители учитывали это при возведении фундаментов. Если в греческих храмах устраивались независимые фундаменты под несущие элементы здания и их неравномерные осадки не вызывали в податливой конструкции здания дополнительных напряжений, то в римском сооружении, которое работает как единое целое, это уже недопустимо, в них и фундамент должен работать как единое жесткое целое. Таким образом, появился новый тип фундамента.

Базилика Юлия Цезаря — довольно крупное сооружение размером 36×100 м была построена в чрезвычайно неблагоприятных грунтовых условиях. Она занимала самое низкое, заболоченное место между Палатинским и Капитолийским холмами, при этом восточная часть здания попадала на подземный дренажный канал — клоаку Максима. При подготовке основания под сооружение строителям пришлось удалить плавунную глинистую почву и рыть котлован до туфовой скалы, обходя и укрепляя клоаку Максима. Устранение дефектов почвы под сооружением — это антисейсмическое мероприятие. Удаленные плохие грунты заменялись искусственной субструкцией, которая представляла собой каменную платформу, армированную деревянными столбами, которая и служила основанием под громадное и тяжелое здание, состоящее из устоев, связанных арками. Базилика Юлия Цезаря сохранила следы многих перенесенных ею землетрясений. В ее цоколе имеются сдвиги и выпучивания огромных каменных блоков. Многочисленные трещины и дефекты верхней части здания говорят о тех колебаниях, которые она испытала при сейсмических воздействиях [17].

Лучшим представителем литой бетонной строительной техники с применением облицовочной одежды можно назвать Колизей — амфитеатр династии Флавиев (75–80 гг.). Это гигантское сооружение не разрушили многочисленные землетрясения, правда, Колизей сильно пострадал от людей, устроивших из него каменоломню. Это сооружение представляет собой овальное кольцо гигантского размера (156×189 м) высотой 49 м, в центре его находится арена. Все сооружение поставлено в низине с плохими намывными грунтами. Для того чтобы устроить прочное искусственное основание, согласно римским правилам, пришлось вырыть котлован и удалить плавунные почвы на глубину до 12–13 м на площади, большей чем площадь самого Колизея. Вместо удаленного грунта была устроена целая система субструкций, которые должны были держать громаду сооружения, подвижные массы зрителей до 50 тыс. человек и также обеспечить его сейсмостойкость. Субструкции были устроены под всем Колизеем, и их конструкция была удачной. Это следует из того, что в Колизее имеется много следов перенесенных им

землетрясений, но обрушений несущих конструкций не наблюдалось. В противоположность ему императорские форумы быстро после постройки стали разрушаться, потому что они не имели общих субструкций под все сооружения.

Далее известно, что в систему субструкций Колизея входили следующие конструктивные элементы: 1) система стен из известняка и травертина на известковом растворе; 2) слоистые фундаменты. В римской строительной практике существует два способа возведения литых конструкций. Первый способ – "монолитный", заключается в непрерывном бетонировании без трамбования, при этом в каждый слой раствора (толщиной в 3–4 см) тут же набрасывается крупный щебень. В этом случае получается довольно прочная однородная монолитная среда. Так бетонировался купол Пантеона, о котором речь впереди. Другой способ – создание "слоистых" конструкций. В стенах между облицовочными каменными блоками или в фундаментах, если это требуется по проекту, укладываются слои известково-пуццоланового раствора мощностью 0,10–0,15 м, на него набрасывается слой мелкого щебня примерно той же толщины. Все это трамбуется и посыпается мелкой крошкой и пылью. Благодаря каменной пыли создаются слоистые стены, или фундаменты, состоящие из прочных плит, которые при сейсмических воздействиях могут проскальзывать друг относительно друга независимо, уменьшая движение, передаваемое от землетрясения снизу, через грунт. Эта идея воплотилась через 2000 лет в сейсмозащиту из скользящих поясов [17]. В искусственное основание Колизея включены такие слоистые конструкции и они, по-видимому, сыграли свою положительную роль в обеспечении его сейсмостойкости.

Надземные части Колизея представляют собой регулярную конструкцию, состоящую из несущих стенок, расположенных по радиусам и усиленных столбами-устоями. Между собой эти стенки соединены арочно-сводчатыми перекрытиями, системой галерей и проходов. Вся конструкция – единый монолитный прочный массив, в котором жесткости и массы распределены равномерно и симметрично. Конструкция Колизея получилась сейсмостойкой, что обеспечено правильной компоновкой, применением сводчатых конструкций из литого бетона, а также подготовкой грунтового основания и созданием единого фундамента с элементами сейсмозащиты под всем сооружением.

Римляне прекрасно ориентировались в том, на каких грунтах и какие надо устраивать фундаменты. Для доказательства этого можно взять какие-либо однотипные сооружения, построенные на различных грунтах, и сравнить их фундаменты. Например, храмы Весты – небольшие круглые ритуальные сооружения. Если сравнить храм Весты на форуме Романум, который стоит на намывных почвах с высоким залеганием уровня грунтовых вод, и храм Весты в Тиволи, который построен на скале, то увидим, что у них совершенно различные фундаменты.

Первый стоит на кубовидной глубоко заложеной субструкции, опирающейся на коренные породы, второй расположен в выемке, искусственно устроенной в скале и заполненной песком [17]. Обратите внимание, что древние строители никогда не ставили свои сооружения непосредственно на ска-

лу, как это делаем мы сегодня, а обязательно устраивали сейсмоизоляцию из песка или из глины.

В V—III вв. до н.э. в своем монументальном строительстве римляне еще широко применяли камень, изготавливая из него довольно крупные блоки. Сначала была кладка насухо, а потом камень стал использоваться как облицовка с заполнением внутренностей стены бутовой кладкой на растворе. К концу III в. до н.э. появляется римский бетон, а во II в. до н.э. в широкое употребление входит обожженный кирпич. Все шире внедрялась строительная техника, основанная на применении мелкоштучного материала, кирпича и бетона. Из фасованного кирпича выкладывали колонны с заливкой внутренних пустот бетоном. В период империи бетон составлял основу стен и сводов. Как облицовочный материал кирпич вытеснил камень. Стены, состоявшие из кирпичной облицовки и внутренней монолитной бетонной массы, и литой купол обладали повышенной прочностью и жесткостью. Для того чтобы придать куполам и стенам какую-то упругость, римские строители армировали купола кирпичными ребрами, а стены — поперечными деревянными брусками, изготовленными из обожженных стволов масличного дерева. Это создавало равномерную осадку стенам и куполам.

Я долго не мог понять, как обеспечивалась равномерная усадка и совместная работа в куполах кирпичных ребер и монолитного бетона, в который они залиты. Если бы это было не обеспечено, то в куполах появились бы дополнительные напряжения и образовались бы трещины, но таких трещин в римских куполах, состоящих из разнородного материала, нет. Значит, кирпич и бетон работают совместно. Как этого добились римские строители? Оказывается, необходимо считать количество замесов бетона, чтобы обеспечить одинаковый объем раствора в массе бетона и в швах кирпичных арок, тогда и усадка в куполах будет равномерной и концентраций напряжений нигде не будет. Таким образом, подбором равного количества раствора 2 тысячи лет тому назад решалась такая трудная строительная задача.

### КУПОЛА... КУПОЛА...

Все строительные конструкции по типу применяемых перекрытий можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся сооружения, в которых используется стоечно-балочная система, примером их являются греческие храмы, о которых уже говорилось выше. Ко второй группе относятся конструкции, в которых перекрытие устраивается с помощью арок и куполов, вызывающих распор, передаваемый на стены и колонны. В этом случае необходимо дополнительно усиливать конструкции, несущие купольное перекрытие. Возникают и другие проблемы. Естественно и легко сопрячь сферический купол и стены здания, выполненного в виде цилиндра, но как это сделать в случае круглого сечения купола и прямоугольного плана стен? Надо обеспечить равномерную передачу нагрузки от купола на стены, чтобы нигде не было концентраций напряжений и перегрузок. Вообще всю историю строительства ку-

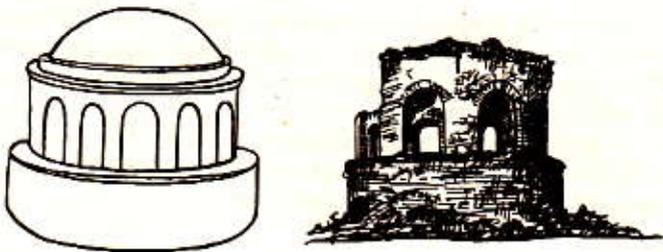


Рис. 29. Центризм мавзолея Елены

полов можно представить как работу по совершенствованию их сопряжения со стенами и облегчение их веса.

Рассматривая купольные системы перекрытий, необходимо добавить еще один принцип сейсмостойкого строительства: чем проще конструктивная схема сооружения, тем лучше.

С появлением купола конструкция усложняется, появляются дополнительные усилия в виде распора, а значит, и дополнительные инертные массы для восприятия этого распора. Кроме того, часто из архитектурных соображений купол на высоком прозрачном барабане еще поднимают ввысь, чем повышают расположение центра тяжести всего сооружения. Все это плохо. Хотя применение купольных перекрытий играет и положительную роль. Сам купол – конструкция симметричная, а следовательно, если здание, перекрываемое им, проектируется разумно и логично, то и подкупольная несущая конструкция должна делаться симметричной. Логично при круглом в плане куполе делать все здание круглым, тогда в нем все массы и жесткости будут распределены равномерно и осесимметрично, это идеальный случай планировки здания с точки зрения сейсмостойкого строительства. В истории архитектуры во все времена и у многих народов известны различные круглые сооружения. Теперь мы называем их центрическими [18]. Это гробницы, храмы, боевые башни и многие другие. Центрические здания были и у греков и у римлян. В качестве идеального образца центрического сооружения можно привести пример двухъярусного цилиндрического мавзолея Елены со сферическим куполом (рис. 29), построенного в 330 г. близ Рима [18]. Глубокие ниши верхнего цилиндра, перекрытые арками, позволили равномерно распределить массы и жесткости по всему объему мавзолея [11]. К недостаткам куполов надо также отнести то, что они чрезвычайно жесткие и тяжелые, особенно те, которые выполнены в римской технике литого бетона, поэтому все древние мастера всегда старались их как-то облегчить и придать им упругость, совмещая их с какими-либо каркасными системами. Так, в мавзолее Елены для облегчения купола были заложены пустотелые керамические амфоры.

При возведении куполов зодчие древности уделяли им большое внимание, с одной стороны, они должны быть технически совершенными, чтобы выстоять при любых потрясениях, с другой – они должны были вызывать эмоциональные возвышенные чувства [19]. Рассмотрим еще

несколько конкретных примеров римских куполов. Начнем с Пантеона, уникального по замыслу и совершенного по воплощению строительной техники того времени сооружения. С точки зрения сейсмостойкости в нем соблюдены все принципы, сформулированные выше. Пантеон можно назвать идеалом сейсмостойкого здания, ведь он простоял почти 2 тыс. лет и при всех многочисленных подземных бурях в его стенах появились незначительные трещины, не опасные для его общей целостности. Рассмотрим все по порядку.

Пантеон (храм всех богов) был построен в 118–128 гг. при императоре Адриане. Здание имеет чрезвычайно простую форму, оно состоит из приземистого цилиндра внутренним диаметром 43,5 м, перекрытого сферическим куполом диаметром 43,2 м, при общей высоте в 43 м. Толщина литой бетонной стены с кирпичной облицовкой составляет 6,7 м [11, 17]. Толщина оболочки купола меняется от 1,8 м у основания до 1,2 м у вершины.

Цилиндр стен Пантеона опирается на кольцевой фундамент шириной 7,3 м и глубиной 4,5 м. Я не нашел описания конструкции фундамента, но я совершенно уверен, что фундамент здесь слоистый, как у Колизея, сейсмоизолирующий с проскальзыванием по песку одного слоя по другому.

Из приведенного описания ясно, что с точки зрения сейсмостойкости общая компоновка Пантеона выполнена идеально. Это чисто центрическое здание, у которого все жесткости и массы распределены осесимметрично. Рассмотрим отдельные конструктивные элементы, не вдаваясь в детали.

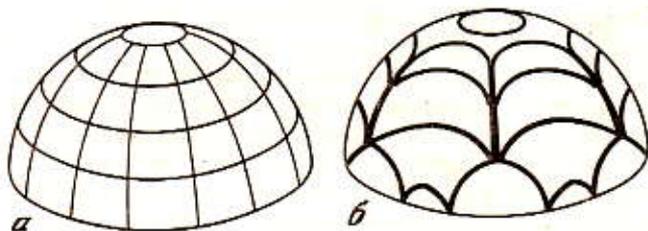
Стены Пантеона облицованы мелким кирпичом с прокладкой через 1 м крупных кирпичных плит, которые надежно связывают облицовку с монолитом стены. Для восприятия распора от купола, который был самым большим в мире почти 2 тыс. лет и чрезвычайно тяжелым (на 1 м<sup>2</sup> перекрываемой площади приходится 7,3 т), толщина стен составляет 6,7 м. Но для облегчения стен с целью экономии материалов и снижения их веса при сохранении той же прочности и устойчивости в них устроено восемь основных ниш шириной 8,9 м, глубиной 4,5 м (рис. 30), есть там и более мелкие ниши. Все это снижает вес стен на одну треть. Таким образом, нижняя часть стен Пантеона представляет собой связанные восемь устоев-пилонов. В самих пилонах для облегчения тоже есть пустоты. Верхняя часть стены имеет более сложную конструкцию. Здесь происходит сочленение цилиндра стен с куполом, при котором строителям удалось осуществить единство масс того и другого, плавно перелив одну массу в другую. Мощные полуциркулярные кирпичные арки двойкой кривизны, проходящие через всю толщину стены, заложенные в массив верхней части стены и перекрывающие ниши нижней части стены, работают подобно упругим волнистым рессорам, на которые опирается сам купол с двойным каркасом из кирпича.

Очень интересна конструкция литого купола Пантеона. Для придания ему некоторой упругости, однородности прочностных свойств и равномерности усадок при бетонировании в массив бетона сферического купола заложены две связанные каркасные системы, выполненные из кирпича. На рис. 31, а показана внутренняя каркасная система купола, она сос-

Рис. 30. Строение стен Пантеона



Рис. 31. Кирпичные каркасы купола Пантеона: а — внутренний; б — внешний



тоит из пяти поперечных ребер и 28 меридиональных. Вся система, разумеется, замкнута и образует регулярный каркас. На рис. 31, б показана внешняя каркасная система, расположенная в монолите купола над внутренней системой. Она состоит из более мощных восьми меридиональных ребер по числу пилонов стены и набора арок, связывающих эти ребра в единый каркас. Указанные ребра внешнего каркаса опираются не на жесткие пилоны, а на упругие арки, перекинутые между пилонами стены. Внешний каркас из-за наличия в нем арок является, по-видимому, более упругим, чем внутренний, состоящий только из прямых элементов. Вот эти две каркасные системы, втопленные в более мягкий однородный массив бетонного купола, обладающий в какой-то степени пластическими свойствами, и создали уникальный по своей идее сейсмостойкий купол. В последующие 2 тыс. лет будет создано много различных куполов, усиленных ребристыми каркасами, но я нигде не встретил в описываемых конструкциях двойных каркасных систем.

Замечательный купол Пантеона цел до сих пор и поэтому не все до конца выяснено с его конструкцией, обычно хорошо изучены рухнувшие сооружения. В нем есть кое-что загадочное, такое, что нам трудно понять с точки зрения современных представлений о работе конструкции. Например, современный конструктор обязательно бы совместил меридиональные ребра обеих каркасных систем, для того чтобы их легче было связать, а древний инженер сделал так, что они не совпадают, взяв их некратное число (8 и 28). Может быть, при таком расположении ребер купол будет более упругим или в нем даже лучше проявятся свойства плас-

тичности. Все это надо бы исследовать. Конструкцией Пантеона с точки зрения ее сейсмостойкости, по-моему, никто всерьез не занимался, а ведь там можно найти готовый ответ на вопрос, как надо строить сейсмостойкие здания из кирпича и бетона.

Выше уже рассказано, что римские зодчие стремились к снижению веса стен Пантеона и веса купола. Делалось это из соображений экономии, эстетики и, конечно, для повышения сейсмостойкости сооружения. Для снижения веса купола, во-первых, по всей нижней поверхности его были устроены кессоны, которые представляют собой углубления между ребрами нижнего прямоугольного каркаса, у основания купола они имеют глубину 0,8 м при ширине 4 м, у вершины их глубина составляет 0,6 м, а ширина 2,5 м. Таких ячеек в куполе всего 140 штук. Ясно, что этим снят значительный вес. Важно, что кессоны отливались одновременно с куполом, в результате чего получилась сферическая оболочка, опирающаяся на арочную систему, образованную ребрами. Во-вторых, для снижения веса купола в нижних его частях, где самые большие напряжения, в качестве заполнителя бетона применялся твердый травертиновый камень, а в верхних частях – более легкие заполнители из туфа и пемзы.

В опорном кольце гигантского купола Пантеона имеются огромные растягивающие усилия, для того чтобы их воспринять, в основании купола сосредоточены большие массы бетона и кирпича – материалы, которые плохо работают на растяжение.

Как видите, даже из такого краткого описания выдающегося римского сооружения понятно, как древние строители продуманно боролись за вечность своих сооружений.

Необходимо отметить, что в 1965 г. [11] высказывались сомнения о существовании каркасов из кирпича на всю высоту купола Пантеона; говорилось, что каркас поднимается только на высоту двух кессонов, но на международном конгрессе по оболочкам в Москве в 1985 г. опять рассматривалась каркасная система всего купола. Думаю, что правы сторонники полных каркасов. Вряд ли римские строители оставили большой массив неармированного кирпичом бетона хотя бы из соображений равномерности усадки, а во-вторых, к чему крепились подмости и опалубка при бетонировании верхней части купола?

Для того чтобы посмотреть, как развивалась инженерная мысль, давайте рассмотрим другой купол, почти таких же размеров, но сооруженный там же спустя 14 столетий. За период строительства у этого купола было несколько авторов, поэтому мы можем проследить творческую мысль в развитии.

С 1506 по 1546 г. крупнейшие зодчие пытались решить очень трудные архитектурные и конструкторские задачи, возникшие при возведении собора св. Петра в Риме. Хотя, если уж быть точными, работы по перестройке базилики св. Петра в собор начались еще в 1470 г. Базилика – это сооружение прямоугольной формы стоечно-балочной конструкции, состоящее из нескольких вытянутых продольных залов, нефов (как правило, трех), разделенных рядами колонн. При возведении нового собора ставилась более сложная задача – кроме большого горизонтального внутреннего пространства, необходимо было добавить вертикальное обозрение, что

можно сделать введением подкупольного пространства. Но теперь купол должен был опираться не на массивные стены, как это было в Пантеоне, а на четыре пилон, которые не должны были разрывать центральное пространство под куполом и пространства боковых нефов. Кроме всего прочего, купол, поднятый на цилиндрическом барабане со множеством световых отверстий, должен был высоко парить над зданием собора.

Как видите, конструкция сильно усложнилась, купол и стены не могли быть единым монолитом, как это было в Пантеоне. За счет поднятия купола на большую высоту поднимался и центр тяжести всего здания. Все это с точки зрения сейсмостойкости плохо, так как нарушаются принципы сейсмостойкого строительства. Думаю, что это понимали те замечательные архитекторы, которые занимались собором. Посмотрим, как дальше развивались события.

По поручению папы Юлия II, д'Анжело Браманте составил проект постройки собора св. Петра вместо старой базилики св. Петра. Строительство началось в 1506 г. Общая площадь здания должна была при этом составлять 134×134 м, а купол Браманте предполагал скопировать с Пантеона, взяв его точно такого же внутреннего диаметра (42,3 м). Новый полусферический купол предполагалось спрятать под семью ступенями монолитного бетона (как и в Пантеоне), а с внутренней стороны устроить кессоны (рис. 32,а). Ясно, что такой монолитный купол был бы очень тяжелым, но в Пантеоне он втоплен в бетон стены, а в соборе Браманте поднят на 48 колоннах, расположенных по периметру купола в три ряда. Такое крепление купола не могло обеспечить ему устойчивость даже от ветровых нагрузок, не говоря уже о сейсмических. У Браманте были и другие ошибки конструкторского характера в проекте собора. Например, подкупольные опорные пилоны, которые начали возводить при нем, были слабы, и последующие строители их усиливали. Ясно, что первый проект собора св. Петра не мог обеспечить сейсмостойкость этому сооружению в условиях частых землетрясений Рима.

После Браманте главным архитектором собора назначается Рафаэль с помощниками Антонио Сангалло и Перуцци. Но, к сожалению, из-за войн и других политических событий со времени смерти Браманте в 1514 г. и до смерти Перуцци в 1536 г., сменившего в 1520 г. Рафаэля, работы по строительству собора практически не велись. Привлекает внимание творческий труд Перуцци над разработкой центральных планов вообще и собора св. Петра в частности. Он ищет новое решение для купола. По-видимому, понимая недостатки купольных опорных пилонов Браманте, он разумно предлагает сделать вместо четырех восемь, усилив 16 приставными колоннами. Но вот по поводу размеров купола предложения у Перуцци были самые фантастические. Он хотел вместо купола диаметром 42,5 м устроить купол диаметром 66 м, а потом он делает предложение построить колоссальное центрическое сооружение с куполом диаметром в 185,0 м. Для сооружения из камня, кирпича и бетона это уже слишком, тем более в сейсмически опасном районе.

Строительство собора возобновил Антонио Сангалло в 1534 г. и этот этап продолжался до 1546 г. Архитектор постарался сохранить сделанное Браманте. Будем продолжать обсуждать только конструкцию купола, не

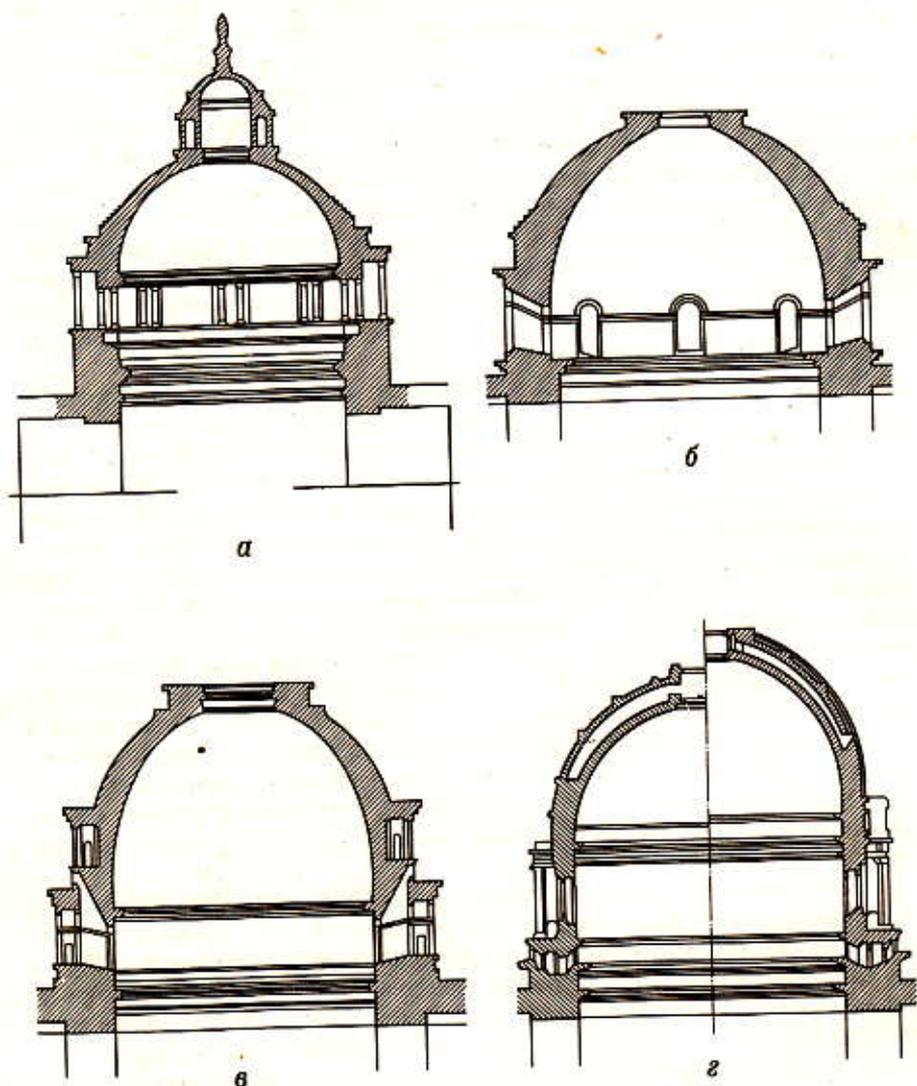


Рис. 32. Варианты купола собора св. Петра, Рим: а — Браманте; б — исходный вариант Сангалло; в — последний вариант Сангалло; г — Микеланджело

рассматривая те изменения, которые происходили в самом здании. Совершенствование конструкции купола для нас самое интересное, впечатление такое, что зодчих интересуют не столько архитектурные красоты купола, сколько его сейсмоустойчивость.

Создавая свой первый проект купола, Сангалло постарался сохранить только внешнюю форму сферического купола Браманте и при этом внести такие конструктивные изменения, которые бы исправили его ошибки.

Прежде всего было усилено соединение между куполом и несущим его цилиндрическим барабаном. Для лучшего восприятия распора от купола значительно была утолщена стена барабана, с 4 (как было у Браманте) до 7,5 м, 48 кольцевых колонн остались, но теперь они были прислонены к стенке с небольшими оконными проемами. Всем этим была обеспечена хорошая связь между куполом и несущим барабаном. Интересны и далеко идут предложения по изменению самого купола. При сохранении сферической внешней поверхности купола внутренняя поверхность имеет возвышенную форму, примененную в Европе 100 лет назад Брунеллески в куполе Флорентийского собора. Кривая Сангалло имеет стрельчатую форму и описывается из двух центров, что обеспечивает плавное сопряжение купола и цилиндра (рис. 32, б). В дальнейшем мы увидим классическое применение стрельчатых куполов и арок в Средней Азии и узнаем, что стрельчатая форма способствует повышению сейсмостойкости конструкций.

По-видимому, проведенные Браманте усовершенствования купола не удовлетворили Сангалло, он зацепился за идею стрельчатости и стал доводить ее до совершенства. Последний вариант проекта собора св. Петра Сангалло составил в 1533 г., он сохранился до наших дней в виде хорошей модели. В этом проекте он синтезировал идеи всех предыдущих вариантов (рис. 32, в). Форма купола эллипсоидная, вытянутая вверх. Ясно, что этим сразу уменьшен распор от купола и обеспечена плавность перехода от купола к барабану. Другая особенность купола Сангалло, обеспечивающая ему повышенную устойчивость, состоит в том, что нижняя часть его охвачена двумя ярусами аркад как поясом. Сами аркады опираются на утолщенную стенку барабана, который теперь надежно гасит распор от купола. Подкупольные опорные пилоны были усилены и с точки зрения прочности новый вариант был вполне приемлем, но сильно заостренный купол, загроможденный двумя ярусами арок, потерял пропорции и архитектурную выразительность. Этот проект не был использован.

В 1547 г. доходит очередь и до Микеланджело. Папа Павел III дает ему широкие полномочия, назначив его одновременно главным зодчим собора, комиссаром и инспектором, поручив наконец-то закончить собор, разобравшись в том строительном хаосе, который царил на строительной площадке со времен Браманте. Микеланджело подверг все сделанное критике и начал перекраивать все заново, используя уже накопленный опыт. Он даже пытался осуществить мечту Браманте и вознести на барабане сферический античный купол. В результате инженерного анализа этот вариант тоже отвергается и он ищет свое решение. Любопытно, что все изменения, которые Микеланджело решительно проводит в конструкции собора, с одной стороны, направлены на придание ему монументальности, архитектурной цельности, а с другой – на повышение его сейсмостойкости. Для повышения сейсмостойкости собора Микеланджело упрощает его план, убирает выступающие части, упраздняет угловые башни. На первый план выдвигается центрально-купольное пространство, вокруг которого формируется все симметричное здание с плавно очерченными сопряженными стенами.

Особое внимание Микеланджело уделяет, конечно, куполу как самому сложному и сейсмически опасному элементу конструкции. Он делает несколько моделей из глины и дерева, но уже в первой модели применяет конструкцию двойного купола (рис. 32, з), состоящего из двух скорлуп, соединенных ребрами жесткости. Материал в таком двойном куполе расположен более рационально, чем в сплошном, только в крайних, наиболее напряженных зонах он получается легче. В уже упоминавшемся Флорентийском соборе хоть и было две оболочки, но несущей была одна, а вторая являлась защитной. Здесь же Микеланджело сделал обе оболочки равноправными, несущими.

Микеланджело успел возвести барабан купола, а сам купол закончил в 1588–1590 гг. Джакомо делла Порта. Следуя идеям Микеланджело, он поднял купол более чем на 4 м, еще более снизив распор.

Созданные по идеям Микеланджело конструкции отличаются изяществом и тонкостью, что не обеспечило им достаточной по меркам того времени долговечности. Стена барабана, возведенного Микеланджело, имеет толщину всего 3 м, к ней добавлено 16 контрфорсов, а в основание купола заложено три кольцевых железных обруча, но всего этого оказалось недостаточно для того, чтобы держать распор от гигантского более чем 40-метрового купола. Контрфорсы из камня отслоились от кирпичной стены барабана и для упрочнения купола в XVIII в. его пришлось усилить шестью обручами, четыре на купол и два на барабан [18]. В отношении прочности массивный барабан Сангалло, конечно, обладал преимуществами. Оказалось, что в таком грандиозном сооружении, как собор св. Петра, трудно совместить законы строительной механики и архитектурные требования. Что касается соблюдения принципов сейсмостойкости в самом здании собора, то они выполняются. Не знаю, на каких грунтах и как заложены фундаменты, но в сооружении с двухосевой симметрией соблюдается принцип каркасности, под которым подразумевается, что все несущие конструкции здания – стены, пилоны, колонны связаны между собой и образуют единые замкнутые контуры, что гарантирует от перегрузки каких-то элементов во время землетрясения. Здание простояло более 400 лет, это подтверждает его сейсмостойкость.

Римские строители большое внимание уделяли облегчению различных конструкций, особенно куполов. Иногда в толщу купола закладывали целые, следующие одно за другим кольца из глиняных пустотелых сосудов, вложенных один в другой [18]. Мы не будем анализировать дальше многочисленные мавзолеи, акведуки, мосты, виллы, базилики, думается, что из уже сказанного понятен высокий профессиональный уровень римских строителей, видна хорошая организация проводимых ими работ и не вызывает сомнений высококачественность их сооружений. Все это может служить прекрасным примером современному строителю.

Прежде чем расстаться с римской эпохой, давайте в заключение рассмотрим еще один вид сооружений – термы, которые играли в общественной жизни далеко не последнюю роль.

В начале III в. (212–216 гг.) в Риме при императорах династии Северов были построены термы Каракаллы – колоссальные общественные соору-

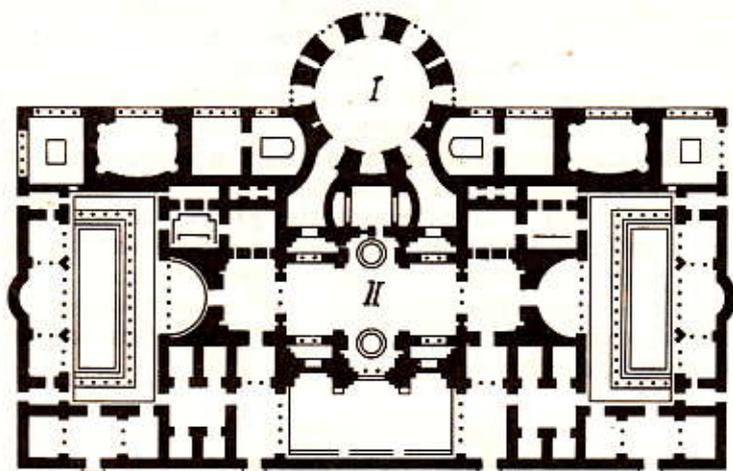


Рис. 33. Симметричная нерегулярность терм Каракаллы

жения многоцелевого назначения. Главный корпус имел размеры в плане  $214 \times 110$  м (рис. 33), состоял из симметрично расположенных помещений различных высоты и площади, перекрытых сводчатыми конструктивными элементами [11]. Это здание хотя и имело одну плоскость симметрии, но по структуре было чрезвычайно неоднородным и нерегулярным. Вообще-то это нарушение принципов сейсмостойкого строительства. Посмотрим, к чему привело это нарушение, для этого проанализируем конструкцию терм детальнее.

Как видно из плана терм, все сооружение группировалось и примыкало к круглому залу с бассейнами, перекрытому литым, как в Пантеоне, куполом диаметром 35 м (I). Центральное место в термах занимал огромный зал размером  $20 \times 54$  м, перекрытый тремя крестовыми цилиндрическими сводами из литого бетона, опиравшимися на шесть столбов с приставными колоннами (II). Это были две самые высокие части терм. Их окружали многочисленные более низкие сводчатые помещения, которые и воспринимали распор от вышележащих частей. Получилось, что передаваемыми и воспринимаемыми распорными усилиями части здания были связаны между собой, поддерживая друг друга, а следовательно, не было антисейсмических швов, которые разделяли бы это гигантское сооружение на отдельные независимо деформирующиеся во время землетрясения части. Это опять нарушение принципов сейсмостойкости. Другим недостатком этого сооружения является то, что оно расположено на склоне холма, и, следовательно, ко всем прочим неоднородностям добавляется неоднородность грунтового основания. А в остальном, если говорить о материале конструкции и прочности несущих элементов, то все это, можно сказать, было сейсмостойким. У А.С. Башкирова [17] есть любопытное, даже спорное рассуждение по поводу сейсмостойкости конструкций терм Каракаллы. Он считал, что разнообразием конструкций древний

строитель заменял гармоничные движения негармоничными хаотическими движениями, гася этим как бы колебания здания, возникающие при землетрясении. Под сказанным он подразумевал, по-видимому, синхронные и несинхронные колебания элементов конструкции. Действительно, за счет неоднородности конструкции происходит некоторое гашение колебаний, но в каком-то месте может произойти и их наложение, поэтому в сеймоопасном районе надежнее иметь дело с конструкцией однородной структуры, в которой напряжения будут распределяться равномерно. Термы Каракаллы дошли до нас в руинном состоянии, и основной причиной их разрушения следует считать подземные толчки.

Думается, что приведенный анализ римских сооружений будет полезен и современному строителю. Отправляемся дальше вслед за римским императором Константином.

### ВИРТУОЗЫ КИРПИЧА

Прочтите медленно и вдумчиво следующие стихи:

Всевышний граду Константина  
Землетрясение посылал,  
И геллеспонтская пучина,  
И берег с грудой гор и скал  
Дрожали, — и царей палаты,  
И храм, и цирк, и гипподром,  
И стен градских верхи зубчаты,  
И все поморие кругом.

Так образно и почти точно описал землетрясение в Константинополе друг А.С. Пушкина Н.М. Языков. Если бы в этих стихах было добавлено после слова "дрожали" еще слово "и падали", то тогда бы описание было более точное. Дело в том, что византийская самобытная строительная техника со многими элементами нового по своему качественному уровню была, конечно, ниже римской высококачественной, хорошо организованной строительной техники. И разрушения византийских сооружений при землетрясениях происходили чаще, чем разрушения римских. Здесь чаще падали купола, даже у такого уникального сооружения, как собор св. Софии, известны обрушения купола при землетрясениях [18].

Кризис рабовладельческого государства на западе Римской империи вызвал к жизни новую империю на востоке — Византийскую с зачатками феодальных отношений. Этот же кризис изъясил арсенал строителей трамбованный бетон, который при новом общественно-экономическом укладе стал малоподходящим. К тому же пуццолановые месторождения оказались теперь на территории остготов и стали недоступными для византийских строителей. Любопытно, что стены Константинополя, возведенные вскоре после его основания (330 г.) в римской технике литого бетона, уже при императоре Юстиниане (527—565 гг.) вызывали только удивление. Техника литого бетона была забыта так основательно, что жителей поражало, как это стены были вырублены из цельного камня, хотя применялась бутовая кладка — некое подобие литого бетона. Она выполнялась на известковом растворе путем послойной укладки

в опалубку щебня и раствора без трамбования. В бутовой кладке достигалась значительная экономия ручного труда, но и прочность ее была намного меньше, что, естественно, ограничивало высоту сооружений, в которых применялась бутовая кладка [20].

Из строительных материалов Древнего Рима Византийская империя унаследовала камень и кирпич. Сначала они добывались для строительства новых сооружений из старинных римских построек. Потом было налажено производство своего кирпича. Но если римский кирпич изготовлялся из чистой хорошо промешанной глины в условиях сильного и равномерного обжига, что позволяло делать его размером до  $70 \times 70 \times 8$  см, то византийский кирпич делался из хуже перемешанной глины с примесями камня с размерами  $35 \times 35 \times 5$  см и это снижало его качество.

Выделим только то новое, влияющее на сейсмостойкость, что появилось в конструкции византийских сооружений. Проанализируем это на примере, а потом рассмотрим специфические элементы сейсмостойкости конструкций того времени.

Выше уже обсуждалось, что существуют две системы строительных конструкций — стоечно-балочная и купольная, как правило, центрическая. В Византии стала применяться третья система, синтезированная из двух первых. Это уже продукт христианской эпохи, когда для религиозных служб потребовались большие помещения, над которыми господствовал купол. Синтезированные системы представляли собой большие продольные помещения, выполненные в стоечно-балочной конструкции, над центром которых возвышался купол, опирающийся на пилоны или стены. Такие конструкции появились примерно в V в., в них гармонично сочетались продольные и центричные системы, традиции Запада и Востока [21]. Зарождение христианства было отмечено землетрясением. Согласно Библии, воскрешение Христа началось с того, что землетрясением был отвален камень, закрывавший вход в пещеру, где он был похоронен. И тогда только спустился ангел и пришли женщины. Христианство поставило новые требования к строительству монументальных культовых сооружений. Если раньше в храм имели доступ только избранные лица, жрецы, а все действие проходило снаружи, то теперь молящиеся собирались внутри и надо было обеспечить всем им место. Хорошим примером новых задач в архитектуре и новых соответствующих конструктивных решений является собор св. Софии.

Изучая строительное искусство Византийской империи, невозможно обойти вниманием собор св. Софии в Константинополе (527–532 гг.), который стоит в первых рядах мировых памятников архитектуры. Форма этого сооружения, кстати, довольно проста (рис. 34). Она состоит из двух постепенно переходящих друг в друга фигур: прямоугольник основного очертания плана, промежуточный овал полукуполов и окружность купола. Все вместе они образуют нечто среднее между продольной базиликой и центрическим зданием. Собор перекрыт большим легким куполом диаметром 33 м, с двух сторон он опирается на арки, выполненные из кирпича, добытого из старых римских построек. К этим аркам примыкают боковые полукупола, несущие распор от главного купола в

продольном направлении. С остальных двух сторон купол опирается на стены, усиленные арками и подпираемые контрфорсами [18].

Основным строительным материалом собора св. Софии является кирпич на цементном растворе (известь, толченый кирпич, песок, вода). В качестве антисейсмических поясов в кладку закладывались прокладки из тесаного камня. Четыре подкупольных опорных столба выложены из блоков крепкого известняка. Для обеспечения равномерного распределения нагрузки в каменной кладке в швы между каменными блоками закладывались пластинки из свинца.

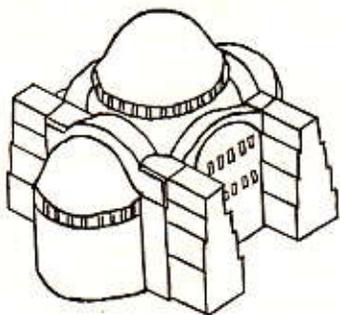


Рис. 34. Собор св. Софии в Константинополе

Любопытно, что свинцовые пластинки, обладающие высокими пластическими свойствами и предохраняющие каменную кладку от концентраций напряжений, в то же время служат изоляторами колебаний, распространяющихся в этой кладке. Византийские зодчие широко применяли свинец в своих конструкциях. Укладка свинцовых пластин на колонны и под колонны обеспечивала равномерную загрузку колонны и предохраняла ее от внецентренного сжатия даже в случае неравномерных осадок всей конструкции. Чтобы свинец при загрузке колонны не выдавливался, его обжимали металлическими обручами.

Собор св. Софии стоит до сих пор и, надо надеяться, простоит еще долго, но все-таки той простоты и гармонии, которую мы наблюдали в Пантеоне, здесь нет.

Обсудим некоторые недостатки Софийского собора с точки зрения сейсмостойкости. Прежде всего общая компоновка. Если взглянуть на наш схематический рис. 34, то видны тяжелые четыре контрфорса, слабосвязанных между собой арками, ясно, что во время землетрясения они, с одной стороны, будут вроде бы поддерживать все сооружение и воспринимать распор от купола, а с другой — будут колебаться, независимо создавая дополнительную нагрузку на стены собора, стараясь от них оторваться. Если к этому добавить, что контрфорсы, стоящие друг против друга, были расположены не по одной оси, а со значительным смещением, то понятно, что они будут провоцировать во время землетрясения закручивание всего сооружения. Далее, эти контрфорсы не обладали достаточной прочностью. Они покосились уже при возведении подпружных арок, а после окончания строительства разошлись на 65 см [20]. Скорее всего,

это произошло из-за неоднородности грунтового основания. Получается, что в сооружении были разрушения еще до землетрясений, а это недопустимо для сейсмостойкого здания. Данных о конструкции фундамента нет.

Обсудим теперь главную архитектурную и конструктивную деталь собора св. Софии — купол. Первоначально он имел очень небольшую стрелу подъема (всего около 8,2 м), что составляет четверть диаметра купола. Такой купол обладает очень большим распором, что с точки зрения сейсмостойкости недопустимо. В результате купол рухнул при землетрясении. Новый купол возведен в 563 г. Исидором Младшим уже в виде полусферы, он на 6,3 м выше старого. Это облегченный, ребристой конструкции купол, сорок его ребер опираются на сорок оконных простенков, которые имеют толщину 2,4 м и играют роль контрфорсов [18]. Четыре подпружные арки, на которые опирается купол, имеют различную жесткость, так как они связаны с различными конструкциями, две связаны с полусферами, а две со стенами. Естественно, что во время землетрясения в куполе за счет опор различной жесткости возникали и неравномерные напряжения. Все это приводило к тому, что купол несколько раз падал и соответственно восстанавливался с усовершенствованиями еще в византийское время. Например, было введено такое усовершенствование: металлические затяжки в основании купола, которые раньше применялись как монтажные и после окончания строительства спиливались, теперь стали оставлять, заметив, что, воспринимая часть распора от купола, они повышают его сейсмостойкость.

Все строительные конструкции можно разделить на два больших класса по их способности к деформациям: гибкие и жесткие. Так вот, собор св. Софии по своей конструкции и по своим материалам относится к жестким. Но жесткость его, по-видимому, обеспечена недостаточно, его части имеют возможность двигаться одна относительно другой, разрушая связи, — в этом и заключается основное несовершенство данной конструкции.

Естественно, византийские зодчие продолжали поиски новых, более совершенных конструктивных схем. Так была найдена крестово-купольная архитектурная конструкция, которая считается основным достижением византийских мастеров [20]. Хотя этот вопрос спорный и некоторые авторы утверждают, что крестово-купольная конструкция была впервые применена в Армении [21].

Если отбросить архитектурно-художественные и конструктивные детали, присущие конкретному сооружению, то крестово-купольная система представляет следующее. Это квадратная в плане площадь, огороженная четырьмя стенами. В центре этого квадрата имеются симметрично расположенные четыре достаточно мощные опоры, которые поддерживают купол, являющийся художественным и конструктивным центром. Центральный купол перекрывает центральную ячейку сооружения. Остальные восемь ячеек, образованных четырьмя центральными опорами, перекрываются, как правило, сводами. С точки зрения сейсмостойкости вся конструкция является симметричной, с достаточно равномерно распределенными массами. Единственное, что может нарушить

общую гармонию, — это центральный купол, поднятый на высоту с помощью цилиндрического или многоугольного барабана. Соответственно надо обеспечить ему крепление. Исходя из принципа каркасности, необходимо также обеспечить связь центральных опор со стенами. Таким образом, крестово-купольная система удовлетворяет в принципе требованиям сейсмостойкости, но окончательное заключение о сейсмостойкости конкретного сооружения можно дать только исходя из анализа его детального воплощения.

Классическая идеальная схема крестово-купольного сооружения — церковь в Иль-Андерин в Сирии, VI в. (рис. 35). Массы и жесткости в этом сооружении распределены довольно равномерно и симметрично относительно плоскостей симметрии. Но самое, пожалуй, главное в том, что куполу обеспечено надежное вертикальное и горизонтальное опирание. В вертикальном направлении держат четыре мощных пилона, а жесткость заделки купола в перекрытие обеспечивают примыкающие к нему цилиндрические своды, образующие жесткий крест. Кроме того, в крестово-купольной системе выполняется еще принцип сейсмостойкости, который был выше назван принципом каркасности, т.е. обеспечение замкнутости вертикальных и горизонтальных контуров конструкции.

Для строительства техники Византийской империи характерно устройство поясов из камня в кирпичной кладке (рис. 36). Здесь также видна мощная арка, перекрывающая ворота, выполненная из четырех рядов кирпича, уложенного плашмя. Применялись также толстые слои раствора, равные толщине кирпича. Все делалось для того, чтобы придать кладке пластичность, упругость и связанность.

Еще один тип замечательных сооружений существовал в Константинополе и его окрестностях — цистерны. Некоторые из них сохранились до сих пор, что говорит о их сейсмостойкости. Они выполняли роль типовых производственных помещений, в некоторых случаях служили для хранения воды, но чаще это просто складские помещения, мастерские (рис. 37). Иногда полуподземные цистерны образовывали обширные платформы, служившие основанием под уникальные общественные здания. Все цистерны однородны по конструкции и отличаются только занимаемой ими площадью, их форма в плане — всегда прямоугольник, количеством этажей может достигать трех. Громадные помещения перекрывались с помощью сводов небольшого пролета, которые поддерживали многочисленные свободно стоящие колонны. В Константинополе было такое сооружение, имевшее размер в плане 72×65 м и называвшееся Бин-Бир-Дирек, что означало тысяча и одна колонна. Эти цистерны являлись в общем-то типовыми сооружениями, но какими надо быть виртуозами кирпичного дела, чтобы точно выложить многочисленные арки, перекинутые во всех направлениях с колонны на колонну, а затем эти арки объединить в единое целое со сводчатым перекрытием, для которого арки являются ребрами жесткости. Жесткий диск сводчатого перекрытия связывался с массивным четырехугольником толстых стен, назначение которых удерживать все перекрытие от горизонтального смещения в случае сейсмического толчка, так как колонны воспринимают только вертикальную нагрузку.

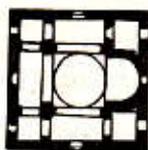
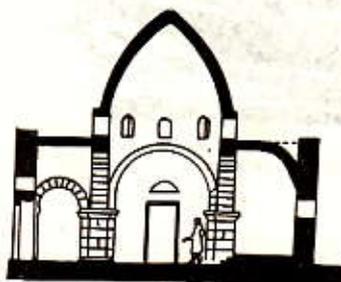


Рис. 35

Рис. 35. Крестово-купольная система



Рис. 36

Рис. 36. Сверхнадежная арка и армирование каменной стены кирпичными прокладками

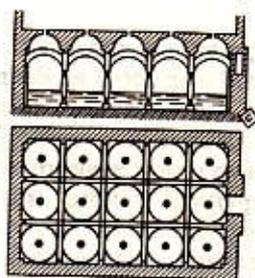


Рис. 37

Рис. 37. Византийская цистерна многоцелевого назначения

Рассмотрим еще один конструкторский прием, известный в Византии. На рис. 36 показано обычное арочное перекрытие, такое же, как римское, но в некоторых случаях византийцы применяли совсем другую конструкцию свода. При строительстве протяженных сооружений типа акведуков и мостов римские строители перекрывали пролеты между опорами с помощью арок. Возникавший при этом распор от полуциркульных арок уравновешивался через опоры распором от соседних арок, получалась связанная цепочка. В результате разрушение любой опоры или арки могло вызвать цепную реакцию разрушений и соседних арок, находящихся теперь в неуравновешенном состоянии. В некоторых византийских подобных сооружениях такая ситуация не могла случиться, так как в них применялось совсем другое конструктивное решение: каждая полуарка является как бы консолью переменной жесткости, а сама арка в замке разрезана. В результате полуарки в замке только соприкасаются без всякого взаимного нагружения. Каждая опора, несущая пару полуарок-консольей, представляет собой уравновешенную систему, и разрушение одного пролета не влияет на прочность всего сооружения [30]. Такая



Рис. 38. Одна из разгрузочных систем

конструкция применялась и сейчас применяется для сооружения мостов в горной местности на Востоке, например в Индии, на Кавказе, в Дагестане [22]. В этом случае делаются береговые и промежуточные устои в виде балок переменного сечения (рис. 38), соединенные укороченным настилом моста, чем значительно снижается пролетный изгибающий момент. Конструкция такого моста получается сейсмостойкой, независимые подвижки гибко связанных устоев ей не страшны.

Совершив очень краткий экскурс по строительным приемам Византийской империи отправляемся дальше на Восток, в те государства, которые имели тесные контакты с Византийской империей, в Армению и Грузию.

## НА КАВКАЗЕ СО ВРЕМЕНИ НОЯ

### СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ АРМЯНСКИХ ХРАМОВ

Давайте начнем наше путешествие по Кавказу с Армении, за начало отсчета времени примем начало новой эры.

Рассмотрим удивительнейшее сооружение I в. – античный храм Гарни, чудом уцелевший от уничтожения. После принятия христианства в Армении как государственной религии языческие сооружения разрушались и на их месте ставили кресты, позднее на этих местах возникли христианские храмы. Так, выдающийся памятник армянского зодчества Эчмиадзинский храм был возведен на месте креста, посвященного Григорию Просветителю, который, в свою очередь, был поставлен на месте разрушенного языческого капища [21]. Гарнийский храм дает представление о неправдоподобно высокой строительной технике того времени и о чрезвычайно квалифицированной продуманности его антисейсмических мероприятий.

Самый первый взгляд на античный храм Гарни вызывает некоторое недоумение. Перед нами вроде бы самый настоящий греческий периптер с завитками ионических колонн (рис. 39). Но это только на первый взгляд. На самом деле в нем гармонично сочетаются греческие формы и строительные приемы с мастерством армянских строителей. Весь храм состав-

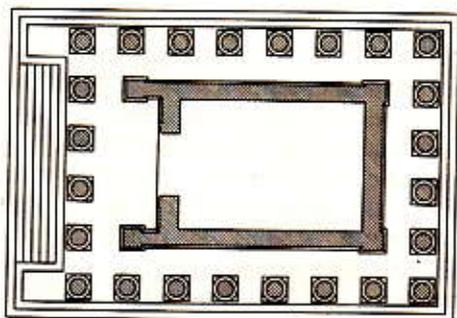
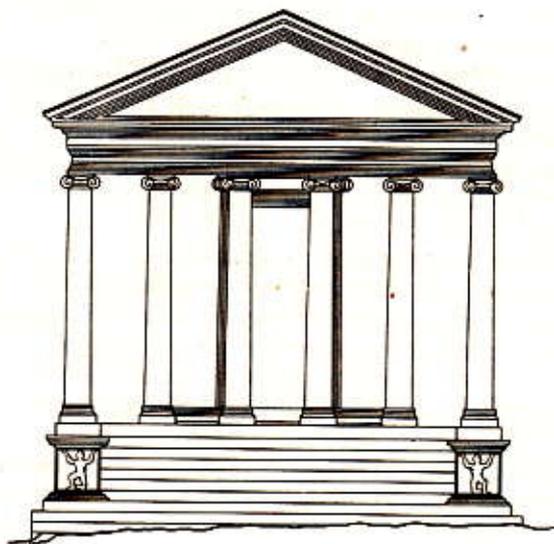


Рис. 39. Греко-армянский храм Гарни

лен из деталей, вырубленных из базальта. Греческие мастера работали в мраморе и известняке, а обрабатывать базальтовые твердые глыбы они бы не смогли.

Храм стоит близко к краю обрыва на наклонном участке скалы, поэтому с помощью известнякового бутобетона и песка скала была выровнена, таким образом была создана горизонтальная площадка. При этом ближе к обрыву толщина бутобетона достигала 2,5–3 м, с противоположной стороны она была практически равной нулю [23]. Из такого же бутобетона чисто по-восточному выполнена платформа, так называемый подиум храма, на котором стоит сооружение. Стены же, как и положено в греческом храме, выложены всухую, без раствора. Камни стен в горизонтальном и вертикальном направлениях соединены между собой железными штырями и скобами, залитыми свинцом, при этом стены сложены из одинарных камней, так что ширина стены равняется ширине камня. Любопытно, что части колонн соединяются двумя и тремя бронзовыми

стержнями между собой, с плитой пола и с перекрытием, греки в таком случае ставили один центральный штырь. Части перекрытия также соединяются стержнями и скобами. В работе [23] приведены довольно убедительные доказательства, что храм Гарни имел над своей центральной частью, целлой, перекрытие в виде цилиндрического свода пролетом 5,5 м из клинчатых камней на известковом растворе и с металлическими связями. Такую конструкцию свода мы уже встречали в причерноморских греческих колониях. Греки, как Вы помните, не применяли сводов в перекрытиях храмов, они устраивали более легкие деревянные стропильные перекрытия. Этот же храм целиком каменный. Пространство между сводами целлы и плоским перекрытием из плит над боковыми колоннадами и кровлей было залито известковым раствором с легким заполнителем из вулканических камней. Таким образом, двускатная поверхность кровли была образована массой облегченного бутобетона, который залит от перекрытия до черепичной кровли.

Если проанализировать конструктивную схему описанного храма, то мы получим модель сооружения, ранее нигде нами не встреченного. Мы рассматривали податливые схемы типа греческих храмов или жесткие монолиты римских сооружений. Теперь мы встретились как бы с комбинированной схемой, которая выглядит следующим образом: две абсолютно жесткие пластинки, нижняя — это платформа из тяжелого бутобетона, верхняя — это перекрытие из камня и легкого бутобетона, а между ними податливая опорная связь из колонн и стен, образованная каменными блоками, поставленными насухо и соединенными унругопластическими связями. В этой модели сооружения все жесткости и массы расположены симметрично относительно продольной плоскости. Размеры сооружения в плане весьма умеренные (порядка 11×15 м), что соответствует требованиям сейсмостойкости. При описанной конструктивной схеме сооружения податливые колонны и стены будут работать во время землетрясения как сейсмоизоляторы. Движения нижней жесткой плиты не будут полностью передаваться на верхнюю плиту за счет смягчающего действия податливо работающих стен и колонн. Соответственно будет снижаться и сейсмическая нагрузка в таком сооружении. Как видите, конструктивная схема этого сооружения очень четкая, жесткий тип фундаментной опорной плиты соответствует жесткому недеформируемому перекрытию.

Весь комплекс антисейсмических мероприятий: сейсмоизоляция, симметрия, снижение веса за счет применения легких заполнителей бетона, унругопластическая связь между элементами, прочность, разгрузочные системы — все это обеспечило сейсмостойкость храму в течение 16 веков. Он рухнул при землетрясении 1679 г. в результате того, что с изобретением огнестрельного оружия окрестные жители стали добывать свинец из его связей, чем сильно снизили его сейсмостойкость. В целом состоянил он, может быть, простоял бы до нашего времени. Пожалуй, основным недостатком с точки зрения сейсмостойкости этого сооружения было то, что он имел унаследованную от греческих традиций тяжелую кровлю. Не очень давно храм Гарни был восстановлен с расчетом на 9-балльное землетрясение.

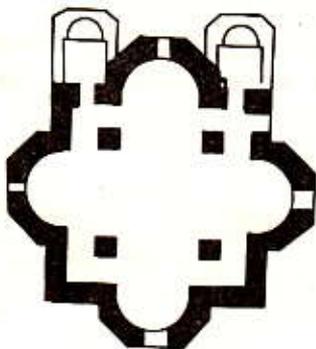


Рис. 40. Центризм крестово-купольной системы церкви Багаран



Рис. 41. Общий вид храма Багаран

Мы рассмотрели замечательное сооружение, выполненное армянскими зодчими во времена античности, и видим их высокий уровень и виртуозность строительных приемов, которые существовали 2 тыс. лет тому назад.

Рассмотрим церковь Багаран, также относящуюся к крестово-купольным сооружениям. Этой церкви в настоящее время уже не существует, хотя в начале века была в довольно хорошем состоянии, рухнул только купол. Находясь на территории Армении, в 1920 г. отошедшей к Турции, памятник был полностью снесен в середине нашего столетия [21].

Церковь Багаран была построена в 624–631 гг. На рис. 40 показан ее центричный план, а на рис. 41 – общий вид [21]. Сооружение имеет две плоскости симметрии, что обеспечивает ему равномерное распределение масс и жесткостей. Четыре пилона, поддерживающие купол, широко расставлены и приближены к стенам. Это сделано для того, чтобы увеличить подкупольное пространство, но в то же время вызывает определенные конструктивные сложности. Арки большого пролета, перекинутые между этими пилонами и поддерживающие барабан достаточно тяжелого купола, будут иметь большой распор. Чтобы его воспринять, пилоны связаны со стенами, устойчивость которых, в свою очередь, обеспечена выступающими контрфорсами-пятигранниками. Вот такая последовательность взаимосвязанных элементов обеспечила прочность, жесткость и совместность работы сводчатых перекрытий первого и второго уровней, что и требуется для сейсмостойкого сооружения.

Из рис. 41 видно, как крест из цилиндрических оболочек, перекрытых двускатной кровлей, поднят на второй уровень. Этот крест сопрягается с куполом через подкупольный барабан. Такая система обеспечивает купольной конструкции надежную опору на пилоны и стены сооружения. Вся конструкция церкви представляет единую жесткую систему. Сейс-

мостойкость всего сооружения определяется прочностью его стен и перекрытий, поэтому давайте детальнее поговорим о конструкции стен и куполов, которые применялись в Армении вообще, а не только рассматриваемого нами памятника.

Основной строительный материал, которым располагали армянские зодчие, — это камень. Менялись времена, менялись люди, менялись и способы возведения стен из камня.



Рис. 42. Трехслойная конструкция стены

В первых церковных сооружениях уже не применялась сплошная кладка насухо из пригнанных друг к другу блоков, а стали использовать трехслойную неоднородную кладку, состоящую из двух параллельных рядов камней, пространство между которыми заполнено камнями с известковым раствором (рис. 42). При этом в первых постройках внутреннее, заполненное бетоном пространство незначительно, соответственно вся нагрузка приходится на камень. Такая конструкция стен, по-видимому, не обеспечит нужной прочности, так как трудно пробетонировать все внутренние пустоты и, следовательно, два ряда камней будут плохо связанными и не будут работать совместно. Тогда стали применять более совершенную конструкцию стен. Камень служил только облицовкой, а во время строительства вдобавок еще и опалубкой, в которую забрасывают крупный плоский щебень, заливаемый известковым раствором. Притеска и пригонка на место облицовочных плит производится настолько тщательно, что раствор не просачивается наружу. При этой конструкции стен нагрузку воспринимает сердечник из бетона и если даже облицовка отвалится, то стена не потеряет несущую способность. Сейсмостойкость таких монолитных стен, ограниченных с двух сторон облицовочными плитами, подтвердили многочисленные жесткие удары подземной стихии, на протяжении многих веков обрушивавшейся на древние сооружения Армении. Эти сооружения, как правило, выстаивали, а уж если падали, то падали, сохраняя в целости крупные фрагменты [24, 25].

В дальнейшем стали еще больше экономить камень, известь и трудозатраты, а следовательно, стену сделали тоньше и нагрузку уже передавали и на бетон и на камень. В этом случае необходимо было обеспечить совместную работу камня с бетоном. Добивались этого укладкой через два-три ряда длинных поперечных связующих камней на всю толщину стены. Такие стены тоже хорошо работают в условиях сейсмических воздействий.

Наконец, в XX в. наступает заключительная стадия совершенствования древней трехслойной кладки. После революции и гражданской войны, среди всеобщей разрухи, восстанавливается Ленинакан. Для возведения стен широко применяется каменная кладка "мидис", которая вроде бы является продолжательницей той древней прочной кладки, имевшей однородное ядро из довольно пластичного материала и соответственно являвшейся сейсмостойкой. Современная кладка ни по своим идеям, ни по своему воплощению, к сожалению, ничего не имела общего с той, древней. Идея трехслойной кладки была доведена в современной до абсурда. Толщина ее была 30–40 см. Она состояла из двух параллельных рядов камней, между которыми имелся небольшой слой цемента. В редких случаях устанавливались перевязочные камни. Вся эта конструкция была ненадежной, хрупкой и обладала низкой прочностью. Соответственно вела себя кладка "мидис" при землетрясении 1926 г. в Ленинакане: стены из нее были неспособны противостоять динамическим воздействиям и рассыпались на отдельные камни. После проведенного обследования последствий этого землетрясения применение такой кладки было запрещено. Но, по-видимому, как деградировала из века в век конструкция каменной кладки, так же менялась человеческая сущность. Очень быстро забылись печальные уроки землетрясения 1926 г. в Ленинакане и опять стали применять кладку "мидис", хотя многие знали, что этого делать нельзя. Каким массовым было падение каменных стен при землетрясении 1988 г. в Ленинакане и Спитаке рассказано и показано много. Почему не был использован опыт древних мастеров? Почему не пошел впрок урок землетрясения 1926 г.?

Каменистую землю Армении слишком часто сотрясали подземные бури, и зодчие не могли оставить этот факт без внимания. Разработано много всяких приемов, направленных на обеспечение сейсмостойкости древних сооружений. Рассмотрим некоторые из них.

Как в Кносском дворце и в Риме, в армянском строительстве применялось армирование каменных стен и оснований сводов деревянными брусьями, придающими им упругие свойства и выполняющими роль антисейсмических поясов. Антисейсмические пояса, назначение которых такое же, как и у обручей на бочке, — стянуть сооружение в единое целое, в некоторых армянских памятниках выполняются в виде камней с зацепами, идущими по всему периметру сооружения.

Как и во всех древних сооружениях, в армянской архитектуре широко применялись разгрузочные системы над дверными и оконными проемами. Можно даже смело сказать, что армянские системы отличались повышенной надежностью. Их было создано великое множество [26], и каждый дверной проем был оригинален по исполнению, хотя в общем-то принцип у них практически один. На рис. 43 показан портал Малой церкви Богородицы в монастыре Макараванк, построенной в XII в. Видно, что разгрузочная система состоит из двух элементов. Это прежде всего плита с полукруглым или со стрелчатым очертанием. Все сделано квалифицированно, как и в Львиных воротах, где самый большой изгибающий момент у середины пролета, там и самое большое сечение. Сверху наддверная плита от вышележащей нагрузки прикрывалась аркой. Арки в Армении

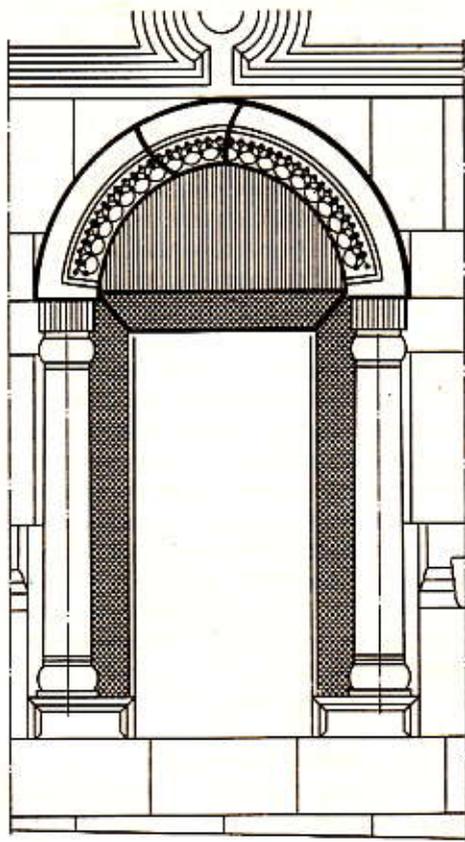


Рис. 43. Разгрузочная система армянского портала

были циркульными, но они не делались из набора одинаковых клинчатых камней, строители стремились сократить число элементов, составляющих арку, выполняя ее всего из нескольких криволинейных брусьев. Это, конечно, повышало надежность работы арки в условиях сейсмического воздействия, уменьшая ее шансы рассыпаться. Более того, составляющие арку камни снабжались зубом, что предотвращало их выпадение при подвижках конструкции [25].

Теперь несколько слов о форме знаменитых островерхих ребристых армянских куполов. Первые христианские церкви имели деревянные покрытия, что с точки зрения сейсмостойкости хорошо. На смену деревянным покрытиям в V–VI вв. пришли каменные своды. Кровля в этих сводчатых перекрытиях устраивалась из черепицы, уложенной по раствору. К X в., когда возобновилось церковное строительство, прерванное арабским владычеством, черепица была вытеснена тонкими каменными плитами. Если черепицей удобно было покрывать любые, в том числе и криволинейные поверхности, то с появлением каменной кровли стали



Рис. 44. Ребристый армянский купол



Рис. 45. Арочный каркас для поддержки купола

применять купола конической формы с прямолинейной образующей (рис. 44). Вес этих куполов был значительно больше и строителям пришлось позаботиться о его снижении за счет облегчения забутовки купола. В забутовку замуровывали глиняные сосуды, ставя их поочередно вдоль свода дном вверх и дном вниз, так же как это делали римские строители. Ребристость куполу придавали для того, чтобы облегчить его, но в то же время эта ребристость обеспечивала куполу прочность и жесткость. В центре Ленинакана при землетрясении 1988 г. разрушился от замачивания грунтов основания храм Спаса, при этом боковые купола ребристо-конической конструкции упали с большой высоты на землю и не разбились.

Заканчивая краткий обзор антисейсмических мероприятий, применявшихся древними строителями Армении, хочется остановиться еще на двух моментах. Прежде всего фундаменты. Существует легенда, что Эчмиадзинский храм построен на песчаной подушке и это обеспечивает ему сейсмостойкость, но достоверных сведений мне получить не удалось ни об этом храме, ни о каких других. Домысливать ничего не буду, а просто оставляю вопрос открытым.

Далее. В древнем зодчестве Армении кроме крестово-купольной системы с опорой на пилоны в XII–XIV вв. была применена оригинальная система бесстолбных перекрытий. Конструктивную основу такого перекрытия составляют пары взаимноперекрещивающихся арок, образующих каркас, поддерживающий купол (рис. 45). Такая конструкция позволяет перекрывать значительные по площади помещения. Обратите внимание, что упомянутые знаменитые купола выполнялись в комплекте с каркасными системами. Все они показали себя достаточно сейсмостойкими. Замечательным примером армянской архитектуры является Гандзасар в Нагорном Карабахе, в котором сконцентрировано все, что накоплено народом-творцом за несколько столетий. Мне посчастливилось побывать в этом храме. Поражает, как точно были пригнаны каменные плиты облицовки, как плотно прилегают друг к другу криволинейные блоки, из которых собраны две пары пересекающихся мощных арок, несущих свод в церкви, как точно входят друг в друга замки каменных плит кровли. Бы-

ло такое впечатление, что если ухитриться разобрать все сооружение по камушку, то не составит никакого труда собрать все заново, при такой точности пригонки камней каждый камень может быть поставлен только на свое место. Храм простоял больше семисот лет без реставрации, так во всяком случае сказали местные армянские товарищи. Я же могу засвидетельствовать, что он не производит впечатления древнего замшелого сооружения с треснутыми стенами и расползающимся перекрытием. Несколько слов о конструкции этого храма.

Строительство церкви Ионна Крестителя было начато в 1216 г. и закончено в 1238 г. К этой церкви с западной стороны был пристроен притвор, законченный в 1266 г. Оба эти здания объединены в одно сооружение, поставленное на пятиступенчатую платформу — стилобат из бутобетона на известковом растворе. Перекрытие церкви крестово-купольное, опирающееся на четыре пилона, связанные со стенами, что обеспечивает всей системе хорошую устойчивость. Арки, перекинутые между пилонами, имеют стрельчатую форму. Притвор, возведенный чуть позже, сделан по другой системе. Его свод поддерживают две пары перекрещивающихся арок. Ближе к краю каждая продольная арка подперта одной колонной и здесь же добавлена еще одна поперечная арка. С точки зрения сейсмологии нецелесообразно делать арку неоднородной жесткости и плохо то, что здания церкви и притвора не разделены между собой антисейсмическим швом, но, по-видимому, все остальное сделано так хорошо, что Гандзасар выстоял более 700 лет без разрушений.

Заканчивая этюды по сейсмостойкости многочисленных древних памятников Армении, трудно удержаться и не рассказать еще об одном армянском храме, чуде архитектуры не то Востока, не то Запада, который может пригрезиться только в потустороннем райском сне. Далеко за пределами Армении известен Звартноц (храм "Бдящих сил"), строительство которого было начато в 643 г. на собранные народом деньги. Общий вид храма показан на рис. 46, а план нижнего яруса на рис. 47. Подобного вида храмы возводились на Востоке, но их было очень немного, и Звартноц уникален как по форме, так и по конструктивному решению. Простоял он более 300 лет и рухнул в конце X в. от землетрясения.

Оригинальна конструкция этого храма: он представляет собой центрическое сооружение, состоящее из трех барабанов, поставленных один на другой. Диаметр нижнего составляет почти 36 м, среднего — около 26 м, общая высота — 45 м. В конструкции храма тщательно продуманы передача и распределение нагрузки. Первый нижний самый большой и самый высокий барабан был образован круговой стеной (см. рис. 47). Второй барабан опирался на кольцо, созданное из каменно-известкового раствора. План этого кольца показан на рис. 47. Это очень интересный элемент всей конструкции. Кольцо имеет длину 82 м по внешнему кругу, ширина его равна 2,75—6,5 м, толщина — 1,5 м. Известковый раствор был такой прочности, что трескается камень, а раствор остается целым. Само кольцо опирается на четыре главных пилона, которые проходят через него и поддерживают самый верхний малый цилиндр с коническим куполом, а также на все колонны первого этажа и связывает их между собой. Вот это прочное кольцо является узловым моментом всей конструкции. Во-пер-



Рис. 46. Общий вид Звартноца

вых, это опора второму ярусу; во-вторых, это антисейсмический пояс, связывающий в единую замкнутую пространственную систему пилоны, колонны и стены первого яруса. Вся конструкция Звартноца получилась легкой и изящной, тем более что строители старались как можно больше облегчить все сооружение, применяя в качестве заполнителя бетона туф и пемзу и закладывая в стены карасы — пустотелые горшки.

Интересны отдельные детали этого храма. Например, колонны изготовлялись из трех элементов: база, ствол и капитель, каждый из них выполнялся из целого камня, а соединялись они с помощью металлических скоб, залитых свинцом. Это был традиционно античный прием, колонны обладали пластическими свойствами и работали практически только на сжатие.

Можно отметить и недостатки конструкции. Нет полной равномерности распределения жесткостей в уровне первого яруса. Как видно на рис. 47, к барабану этого яруса без шва пристроена на всю его высоту как бы башня, в которой находилась лестница для подъема на верхнюю галерею. Она, конечно, как-то нарушала равномерность распределения масс и жесткости. Есть еще один опасный момент в конструкции храма. Описанное выше монолитное кольцо опирается на пилоны и колонны через восемь большепролетных сводов, арки которых образуют круг и имеют двойную кривизну, буквально как в Пантеоне, выступая из своей плоскости более чем на 1 м. Ясно, что такая форма арок будет вызывать их закручивание, что не очень хорошо для такого хрупкого материала, как ка-

Рис. 47. План нижнего яруса Звартноца и опорное кольцо храма

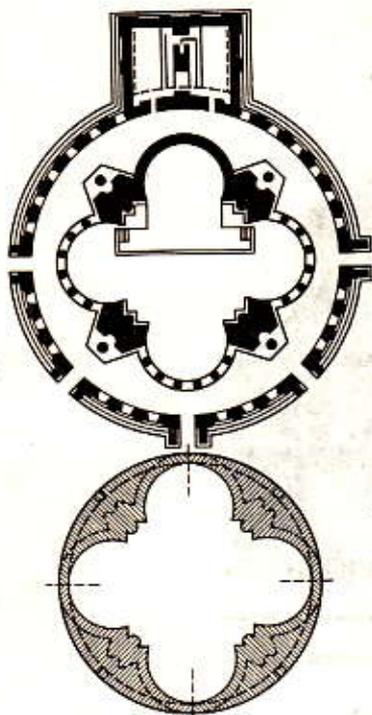
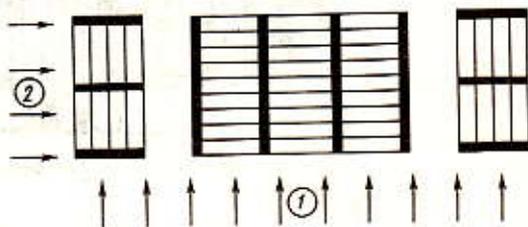


Рис. 48. План несущих стен зданий, рухнувших при землетрясении 1988 г. в Армении

Пояснения см. в тексте



мень. Однако, если бы такая конструкция была ненадежной, она бы рухнула уже при строительстве, но храм простоял 350 лет [7]. Некоторые исследователи ищут причины, почему же Звартноц все-таки рухнул. В чем были ошибки? Может быть, качество было плохим, или пилоны в 22 м были слишком длинными, или кольцевые колонны слабоваты, или, может быть, что еще. Я согласен с Т.А. Марутяном [27], который высказывает мысль, что никаких ошибок не было, а трехвековое владычество арабов привело храм к обветшанию и затем к разрушению.

Звартноц простоял более трех веков при всех подземных бурях и рухнул. А у нас при землетрясении 1988 г. в Армении падали здания, которые и трех лет не простояли. Плохим было не только качество строительных работ, были сделаны грубейшие ошибки и в проектах. Возьмем серию пятиэтажных зданий, которые при этом землетрясении занимали по разрушаемости одно из первых мест. В этих зданиях был нарушен основной принцип сейсмостойкости: жесткости и массы в здании должны быть распределены равномерно. На рис. 48 показано, как были расположены несущие стены и плиты перекрытия в этих пятиэтажках. Отдельно стоящая стена может сопротивляться нагружению в своей плоскости и почти не сопротивляется нагружению, если сила направлена к ней перпендикулярно. Для повышения сопротивляемости продольные и поперечные стены связываются между собой, образуя замкнутые контуры. Здесь же это

го не было сделано, стены продольного направления по торцам здания не были связаны со стенами поперечного направления в центре здания. При ударе сейсмической волны в фасад здания, как показано стрелками с цифрой 1, разрушались торцы здания. Если волна шла вдоль здания, как показано цифрой 2, обрушался центр здания, так как его стены не могли работать из своей плоскости. Если волна подходила под углом к зданию, могло обрушиться все здание, что часто и случалось. Здесь не было единого жесткого диска, как в Звартноце, который обеспечил бы совместную работу стен разного направления. Так что есть чему поучиться у древних зодчих.

Продолжим наше путешествие по Кавказу. Мне хочется познакомить Вас с некоторыми народными строительными традициями.

### БАШНИ В ГОРАХ

Строительство башен издавна было распространено на Кавказе. Назначение у них было самое разнообразное: это боевые и жилые башни, часовни и мавзолеи. Основным строительным материалом служил камень, в качестве связующего вещества использовались известь и глина. Среди всех построек горных селений башни, особенно боевые, являлись сооружениями уникальными. Их строили лучшие мастера из крупных хорошо подобранных каменных блоков. Не зря существовала поговорка, что из камней башни можно построить селение, а из камней всего селения нельзя построить одной башни. Здесь проводилась тщательная подборка материала, выветренные, трещиноватые камни отбраковывались. Стоили башни дорого и были доступны обеспеченным семьям, хотя и строились из местных строительных материалов, местными мастерами. По форме башни были преимущественно прямоугольными, редко круглыми, хотя удобство круглых башен с точки зрения обороны и с точки зрения сейсмостойкого строительства неоспоримо. Естественно, что сельские мастера не применяли каких-либо особых антисейсмических мероприятий, они строили из тех материалов, что были под рукой, и добивались прочности и устойчивости своих творений, применяя исторически выработанные традиционные формы.

В Дагестане в селе Ицари стоит редкая для этих мест оборонительная башня в виде усеченного конуса (рис. 49). Она была построена в XV в. местными жителями, когда их князь перенес свою резиденцию из их села в другое место, и жителям села приходилось рассчитывать при обороне только на свои силы. Форма башни и способ укладки каменных материалов говорит о том, что ее строители хорошо владели каменным делом, разбирались в фортификации и даже представляли себе статику работы сооружения. Коническая форма башни обеспечивает ей общую устойчивость. В ней идеально равномерно распределены массы и жесткости. В нижней части башни кладка выполнена из крупных каменных блоков, уложенных плашмя. В средней части башни кладка идет поочередно рядами камней, уложенных плашмя и стоя, что обеспечивает однородность свойств каменной кладки, стены по высоте постепенно сужаются кверху.

На рис. 50 показан пример вайнахской боевой башни классического типа.



Рис. 49. Чудо света местного значения

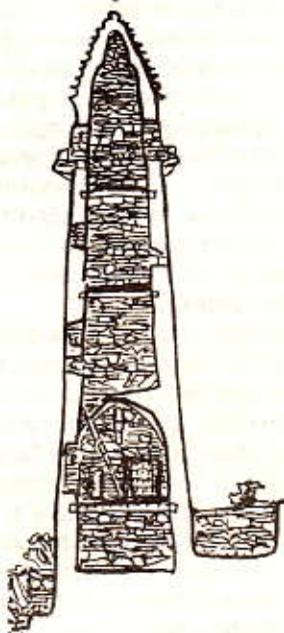
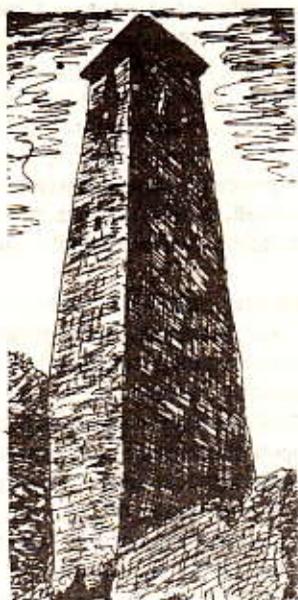


Рис. 50. Общий вид вайнахской боевой башни и разрез вайнахской башни

Рис. 51. Пирамидальная гробница

Высота таких башен была 20–25 м, сторона плана – 5–5,5 м, число этажей – от пяти до семи. Очень сложно были выложены стены: они утоньшались кверху и одновременно имели наклон внутрь, в результате силуэт башен имел четко выраженное сужение. Получается, что строители башен добивались не только симметрии, но и снижения веса конструкции и понижения положения ее центра тяжести, а в конечном счете и сейсмостойкости.

Кладка стен велась на известковом растворе, иногда очень прочном. В Дагестане применялся и глиняный раствор, что значительно снижало прочность кладки и не позволяло выполнять стены этих башен с наклоном внутрь. В самых совершенных вайнахских башнях Большого Кавказа устраивались ступенчато-пирамидальные перекрытия, что венчало их архитектурный облик и предохраняло от осадков (см. рис. 50). Междуетажные перекрытия выполнялись также в виде сомкнутого четырехстороннего ложного свода, путем постепенного надвига камней, это создало жесткие диски по высоте башни. Эти диски играли роль антисейсмических поясов. В вайнахских боевых башнях воплощены почти все принципы сейсмостойкого строительства. В остальных башнях применялись деревянные перекрытия, и с точки зрения сейсмостойкости они уже не были столь совершенны по самым разнообразным причинам: слабый раствор, тяжелые стены, неоднородная кладка, отсутствие дисков жесткости, ненадежная глинобитная кровля.

Замечательны по своему виду и конструкции традиционные гробницы, раскинувшиеся группами или поодиночке по горам Осетии (рис. 51). Это небольшое квадратное в плане сооружение, стены с легким наклоном внутрь, плавно переходящие в высокое сводчатое перекрытие. В швы между камнями сводчатого перекрытия закладывались выступающие наружу каменные плитки, что придает осетинским гробницам необычный вид, чем-то напоминая многоярусные пагоды Индокитая. Вообще в традиционном народном строительстве можно найти почти все зачатки конструктивных приемов, которые потом в более совершенном виде используются в монументальном строительстве дворцов, храмов и обеспечивают им прочность и долговечность. Это устройство прочных стен и фундаментов, применение различных разгрузочных систем, возведение сводов и многое другое. Продолжим наше путешествие, теперь отправимся на равнины Закавказья.



## ОГНИ И БАШНИ АПШЕРОНА

Сейсмические бури, возникающие в недрах Кавказских гор, сотрясают и эту огромную равнину, представляющую центральную часть Азербайджана. С трех сторон эту равнину окружают горные хребты, а с восточной, четвертой стороны, она упирается в Каспийское море, далеко врезааясь в него Апшеронским полуостровом. Разнообразие природных богатств, свои исторические традиции, другая вера – все это породило иные архитектурно-строительные задачи и их решения. Имеется связь с другими народами Кавказа и Средней Азии. На землях этой плодородной равнины люди селились очень давно, найдены поселения оседлых скотоводов, относящиеся к VI–IV тыс. до н.э. Эти селения были застроены круглыми хижинами, перекрытыми сводами из сырцового кирпича [31]. С тех пор и началось накопление строительного опыта. Но не будем так глубоко забираться во тьму веков.

Начнем с Девичьей башни, которой до сих пор можно полюбоваться в Баку (рис. 52). Она резко отличается от других оборонительных и культовых сооружений Азербайджана. Все в ней загадочно: от времени сооружения (в одной исторической работе говорится, что она построена в VIII в. до н.э. (3), в другой – в XII в. н.э. [2]) до назначения (с одной стороны, это вроде бы башенный храм огнепоклонников, с другой – башня построена для того, чтобы в ней прятались жители города). Девичьей она и названа потому, что враг ни разу не овладел ею. Совершенно непонятно назначение контрфорса, который абсолютно несимметрично упирается в бок круглой башни.

Башня представляет собой восьмиэтажное сооружение в виде усеченного конуса, стоящее на наклонном участке скалы, со стороны суши ее высота с парапетом равна 32 м, а со стороны моря – 35 м. Как видно из рис. 52, к башне примыкает мощный контрфорс, который, в свою очередь, подпирает стена с небольшими контрфорсами. Это предохраняет башню от сползания по наклонной плоскости. Видимо, древний строитель сумел позаботиться об устойчивом основании башни. Стены башни имеют толщину от 5 м в нижней части до 4 м в верхней части, сложены они из блоков известняка на прочном известковом растворе. С помощью плоских каменных куполов внутреннее пространство башни разделено на восемь ярусов. Свообразная ребристая внешняя поверхность башни образована чередованием выступающих и утопленных рядов кладки [2].

Башня представляет собой чрезвычайно жесткий очень тяжелый массив с равномерно распределенными массами и жесткостями (если не учитывать боковой контрфорс). Этот сбоку упирающийся в башню контрфорс действительно можно не учитывать, так как в данном случае он должен вызывать при землетрясении закручивание башни, но у нее такие толстые стенки и соответственно такой большой момент сопротивления кручению, что закрутить ее невозможно. Несмотря на полное несовпадение материалов и конструкций, эта башня по своему весу напоминает египетские сооружения.

Теперь давайте рассмотрим обыкновенную оборонительную башню, каких было много построено на Апшеронском полуострове.



Рис. 52

Рис. 52. Несимметрия башенного храма огнепоклонников

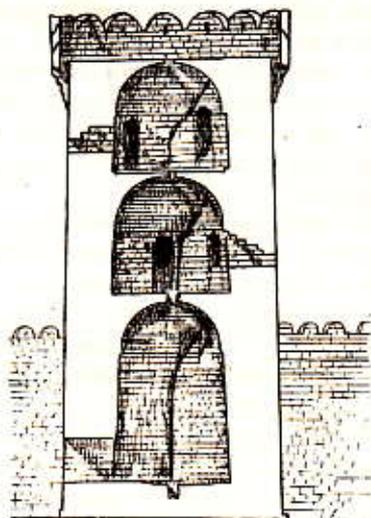


Рис. 53

Рис. 53. Конструкция массивной каменной оборонительной башни



Рис. 54

Рис. 54. Оборонительная башня

В селении Мардакян сохранилась недавно реставрированная круглая, в виде усеченного конуса, башня высотой 16 м и диаметром в основании 7,6 м, ее разрез показан на рис.53. Башня сложена из местного известняка на высокопрочном известковом растворе. Ее внутреннее пространство расчленено сферическими куполами из того же камня на три яруса. Время сооружения этой башни 1232 г. Сейсмостойкость этой жесткой чрезвычайно пропорционально сложенной конструкции объяснять не приходится.

Позднее в замках стали строить башни прямоугольной формы. В том же селении Мардакян сохранился замок XIV в. с башней прямоугольной

формы, усиленный в углах круглыми колоннами (рис. 54). Здесь также применена каменная кладка на известковом растворе, но балочные внутренние перекрытия выполнены из дерева [2]. Сейсмостойкость этих оборонительных сооружений обеспечена достаточно скромными размерами, симметрией распределения масс и жесткостей, прочностью кладки, при этом ни о каких снижениях веса, а тем более о сейсмоизоляции речи здесь нет.

Теперь давайте рассмотрим несколько мемориальных сооружений, которые имеют более сложные конструктивные решения с более сложными архитектурными формами. В 1162 г. было закончено строительство мавзолея Юсуфа. На рис. 55 дан разрез и план этой усыпальницы, а на рис. 56 – общий вид. Перед Вами довольно обычное сооружение того времени, но как оно совершенно по своему замыслу и по исполнению! У мавзолея прекрасные пропорции, выполнен он из обожженного кирпича на прочном растворе. Восьмигранный план мавзолея – это почти идеальная форма с точки зрения сейсмостойкости. Умеренной толщины стены ужесточены снаружи ребрами, образующими как бы наружный каркас, имеется и внутренний каркас, перекрытый стрельчатыми арками. Над этими арками стена расширена, образовано опорное кольцо для двух куполов, наружного восьмигранного и внутреннего стрельчатого. Восьмигранные стены плавно переходят в восьмигранный купол. Обобщающий принцип сейсмостойкого строительства, гласящий, что строить надо так, чтобы при землетрясении нигде не возникало концентраций напряжений, здесь выполнен. Весь объем мавзолея представляет собой жесткую конструкцию.

Хотелось бы еще раз обратить Ваше внимание на то, как у древних мастеров гармонично сочеталось знание, использование накопленных до них традиций и творческий подход к тому, что они создают. Вот любопытный пример. Около селения Джиджимли стоит совершенно фантастический ни на что не похожий мавзолей XII в., по форме напоминающий глинобитные хижины времен раннебронзового века, выполненный в строительной технике уже своего времени (рис. 57). Мавзолей сложен из грубо-сколотого камня и облицован крупными чистотесанными плитами на прочном растворе. Стены мавзолея плавно наклоняются внутрь и весь он венчается куполом параболического очертания. При таких плавных очертаниях не приходится говорить ни о каких неравномерных распределениях масс и жесткостей. Жесткая, прочная и достаточно легкая скорлупа этого мавзолея обеспечила ему сейсмостойкость.

Уникальные сооружения Азербайджана выполнялись с учетом самой передовой строительной мысли того времени. В Иране в Султанье сохранился памятник азербайджанского зодчества – мавзолей Ольджейту-Ходабенде (1307–1313 гг.) [2]. Этот выдающийся памятник архитектуры вобрал в себя лучшее, что было создано к этому времени в строительстве. На рис. 58 показан разрез мавзолея, выполненного из кирпича. Привлекает внимание высоко вытянутый вверх стрельчатый, состоящий из двух оболочек купол. Диаметр купола равен 23,3 м, высота – 20 м, общая высота зала мавзолея от пола до замка купола составляет 51 м.

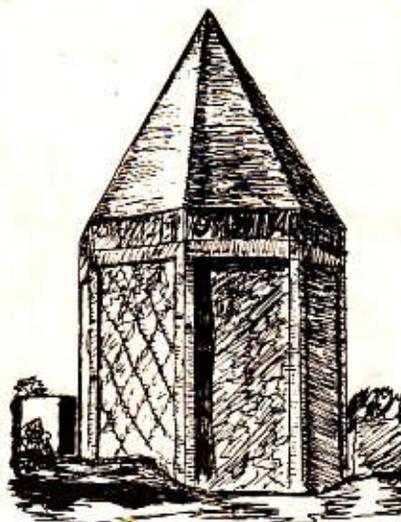
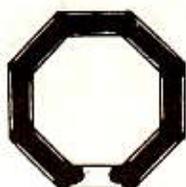


Рис. 55. Центризм и архитектурная гармония мавзолея Юсуфа

Рис. 56. Общий вид мавзолея Юсуфа

Стреловидная форма купола и его двойная оболочка, соединенная ребрами, образующими каркасную систему, напоминают и купол Флорентийского собора, и купол собора св. Петра, о которых мы говорили. Эти стреловидные купола делались для того, чтобы снизить распор. Оболочка купола была двойной, что уменьшало его вес при сохранении прочности и жесткости. Любопытно, что мавзолей в Султанье, построенный намного раньше Флорентийского собора, имеет более совершенный купол. В соборе оболочки купола не равнозначны: внутренняя – несущая, а внешняя – защитная; в мавзолее же обе оболочки равнозначны в своей совместной работе, что является, разумеется, большим достижением строителя. Следующий важный момент, связанный с сейсмостойкостью купольного перекрытия, – это плавность сопряжения купола со стенами. В этом мавзолее вопрос решен до гениальности просто; перекрываемая громада зала является правильным восьмигранником. Сопрячь же восьмигранник с кольцом не представляет труда. Далее, куда передать распор от купола? Эта задача также решена на высоком техническом уровне с большим запасом прочности. Во-первых, в нижней части купола имеется противораспорное монолитное кольцо, армированное тремя металлическими обручами. Во-вторых, возможный распор держали своды галереи, опоясывавшей основание купола. В добавок углы мавзолея были

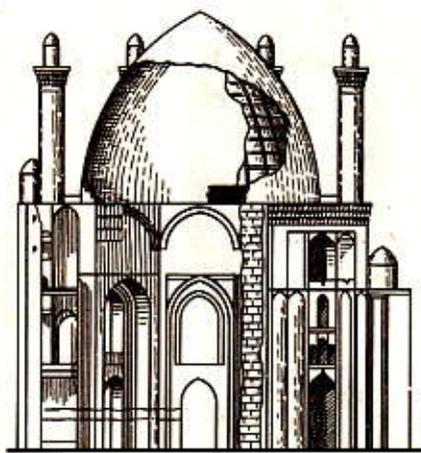
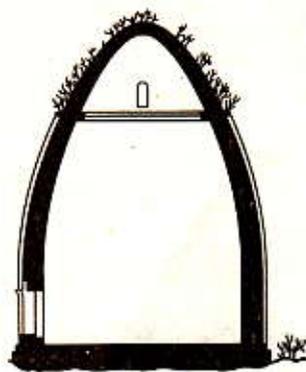


Рис. 57. Скорлупа мавзолея Мелик Аждара

Рис. 58. Мавзолей Ольджейту-Ходабенде

догружены минаретами, также уравновешивающими распор от купола. Сводчатые галереи в основании купола широко применялись в сооружениях Средней Азии, например в мавзолее султана Санджара в Старом Мерве.

В рассматриваемом мавзолее использованы все приемы, направленные на погашение распора от достаточно большого купола: стреловидная форма, двойной облегченный купол, армированное опорное кольцо, плавное сопряжение купола со стенами, сводчатая обходная галерея, пригрузка минаретами. Даже в наше время мы не смогли бы сделать большего.

Купол мавзолея опирается на стены, в которых заложены арки из кирпича, как в Пантеоне, только уже стреловидной формы. Так же как в Пантеоне, стены облегчены глубокими нишами, перекрытыми стреловидными кирпичными арками. Вот пример высокого строительного искусства, достигнутого много столетий назад зодчими Закавказья [2].

В бассейне р. Аракс в XIII–XIV вв. была построена группа мавзолеев, в которых для облегчения веса купольных перекрытий в них закладывались глиняные кувшины, как это делалось в Риме, Византии, Армении.

Нельзя не упомянуть знаменитые "длинные стены", строившиеся на севере Азербайджана для защиты Прикаспийских равнин от вторжения северных кочевников. Гигантские оборонительные сооружения Дербента были сооружены из крупных каменных блоков на известковом растворе в VI в. Каменная кладка стен и башен этих оборонительных сооружений велась обычно из двух параллельно поставленных каменных стен, пространство между которыми заполнялось бутовой кладкой на извест-

ковом растворе. При этом каменные стены выкладывались из плотно пригнанных насухо каменных плит, поочередно уложенных ложком и тычком, что обеспечивало надежную связь между облицовкой и заполнением. Такие трехслойные оборонительные стены, имеющие толщину до 3 м и высоту 12 м, хорошо противостояли ударам не только таранов, но и сейсмической стихии. Любопытно, что как и в византийских оборонительных сооружениях, башни в Дербенте устраивались впритык, но без связи со стенами [2].

Можно назвать и другие антисейсмические мероприятия того времени. Применялось армирование кирпичной кладки деревянными брусками, закладывались также деревянные бруска над входными проемами. Для чего все это делалось, мы уже говорили. Наряду с известковыми растворами применялись гяжевые. Известковые растворы более твердые и хрупкие, чем гяжевые, которые, в свою очередь, более пластичные и прочные. Кстати, цементные растворы еще более твердые и хрупкие, чем известковые. Естественно, что если хотели кирпичной и каменной кладке придать пластические свойства, применялись гяжевые растворы. При этом значительно увеличивали толщину постельных швов между кирпичами. Это чисто антисейсмической прием, который широко использовался в Средней Азии. Применялись также кирпичные пояса в каменной кладке, как это делалось в Византии. Почти все сооружения Азербайджана обладали свойством центричности. В Нахичивани были построены подземные склепы оригинальной, редко встречающейся конструкции, которая обеспечивала им сохранность при любых потрясениях. Основу этой конструкции представлял центральный мощный столб, на который опирался один конец арок перекрытия, другой конец арок опирался на стены.

Получив некоторое представление об антисейсмизме древнего Азербайджана, отправимся в Среднюю Азию. В XIV–XV вв. при Тимуре и тимуридах в Средней Азии появились пышные мавзолеи, украшенные тяжелыми порталами, что разрушило центризм этих сооружений и соответственно ухудшило их сейсмостойкость. Тогда же мавзолеи с пристроенными порталами появились в Азербайджане.

## ЧУДЕСА СЕЙСМИСТОЙКОСТИ В СРЕДНЕЙ АЗИИ

### ДОИСТОРИЧЕСКИЕ ВРЕМЕНА

В Средней Азии уже в V–IV тыс. до н.э. складывается оседлая культура земледелия, в оазисах возникают небольшие поселки, выплавляется медь, налаживается связь с Шумерами. В III–II тыс. до н.э. на юге Средней Азии складывается сообщество, культура которого получила условное название Алтын-депе. Из монументальной архитектуры того времени известен большой культовый комплекс, посвященный богу Луны, включавший четырехступенчатую башню высотой 12 м и длиной 28 м, очень похожую на зиккураты Месопотамии. В VI в. до н.э. складывается первое

государство — Бактрийское, вскоре присоединенное как и все остальные оазисы Средней Азии к персидской державе Ахеменидов.

Ахеменидская держава рухнула после поражения при Гавгамелах в 331 г. до н.э. от греческих войск Александра Македонского. А в 305 г. до н.э. Средняя Азия уже вошла в государство Селевкидов с центром в Вавилоне. В 250 г. до н.э. образуется самостоятельное загадочное Греко-Бактрийское государство, независимость приобретают Парфия и Хорезм, а в I в. до н.э. они уже входят в крупнейшую империю древнего мира — Кушанскую. В дальнейшем на территории Средней Азии возникают и исчезают государства, меняются общественные формации, приходят и уходят целые народы, складываются разнообразные архитектурные формы.

Отправимся в городище Топрак-кала, расположенное в низовьях Амударьи. Этот археологический комплекс содержит хорошо укрепленный город, Высокий дворец на платформе, Нижний дворец, крепость и загадочное обширное ровное пространство, обнесенное валом. Это остатки столицы царей Хорезма. Самый первый активный период существования этой столицы приходится на I—III вв. н.э. Из всех многочисленных сооружений этого города рассмотрим только Высокий дворец, расположенный на гигантской платформе. Этого нам будет достаточно, чтобы представить строительную технику того времени.

При изучении строительных конструкций Высокого дворца невольно создается впечатление, что мы вернулись в долины Месопотамии, где основным строительным материалом являлся сырцовый кирпич из лёссовой глины, где сооружения ставились на специальные платформы и где начали применять сводчатые конструкции. Здесь в Топрак-кала, как, впрочем, и в других памятниках Хорезма того времени, основным строительным материалом являлся сырцовый кирпич из лёссовой глины. Из этого кирпича изготавливались все несущие конструкции. При этом существовало два типа кирпича. Первый, самый распространенный, обычный кирпич квадратной формы размером в среднем  $40 \times 40 \times 10$  см, который превосходит весом современный примерно в 8 раз и весит порядка 38 кг. Этот кирпич употреблялся в кладке платформ, стен и балочных перекрытий. Как правило, он составлял в кладке 57% общего объема, остальное — глиняно-песчаный раствор. Из приведенного описания ясно, что такая кладка обладала свойствами пластичности. Второй тип кирпича имеет трапециевидную форму, он применялся при возведении арочных и сводчатых конструкций. Этот кирпич отличается от первого не только формой, но и составом, что влияло на его механические свойства. В глину при производстве кирпича второго типа добавляли рубленую солому, уменьшая количество песка, что снижало объемный вес кирпича и делало его более пластичным. В наиболее ответственных элементах конструкции применялся более качественный кирпич. После такого краткого вступления можем уже непосредственно заняться конструкцией Высокого дворца.

Этот дворец был поднят на огромной платформе высотой 14,3 м, которая имеет вид правильной четырехугольной усеченной пирамиды. Размер

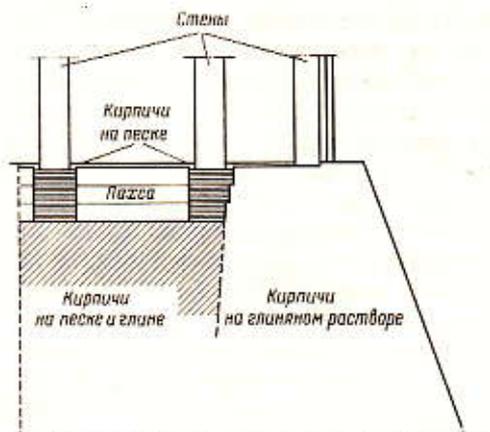


Рис. 59. Сырцовая стена дворца Топрак-кала



Рис. 60. Каменная база деревянной колонны

нижнего основания составляет  $92,5 \times 92,5$  м, верхнего –  $82,5 \times 83,1$  м. Для представления о масштабности платформы могу сообщить, что на ее строительство ушло около 6 млн штук кирпичей. Назначение платформы многоцелевое: оборона, далее защита от наводнений, возвеличивание царского дома, защита сооружений, поставленных на эту платформу, от сейсмических волн. Сооружения Нижнего дворца также поставлены на платформы, правда, уже не на такие гигантские.

Разрез стен дворца, фундаментов под ними и платформы показаны на рис. 59. Форма опорной платформы под дворец в виде усеченной пирамиды способствует ее устойчивости при землетрясении. Кроме того, платформа по всему периметру схвачена мощной прочной стеной из кирпича на глиняном растворе. Центральная же ее часть представляет собой слоистые субструкции из кирпича на песке и глине, вспомните слоистые субструкции Колизея. Под внутренними стенами устроены податливые подушки из кирпича на песке, что предохраняет стены от неравномерных осадок и от сейсмических ударов. Внешняя стена для обеспечения ее устойчивости во время землетрясения снабжена через каждые 1,8 м парными выступами. Во дворце встречается два вида перекрытий: плоское, по деревянным балкам, и сводчатое, из специально приготовленного кирпича. Любопытно, что для сооружений Хорезма того времени характерны своды в виде эллипсов или близкие к ним. Для повышения надежности своды выкладывались в несколько рядов, что позволило некоторым из них уцелеть до нашего времени. Как облицовочный материал применялся обожженный кирпич [29].

Если в Высоком дворце внимательно присмотреться к обнажившимся слоям сырцовых кирпичей, то на них виден след человеческой руки. На гранях отформованного уже кирпича мастер рукой пропахал борозды. Это сделано для улучшения сцепления между кирпичами. Это примерно

то же, что делали греки, создавая шероховатые поверхности между блоками. Уже было сказано, что во дворце применялись плоские перекрытия. В случае небольших пролетов деревянные балки перекидывались со стены на стену, на них уложен накат из жердей, слой камыша, промазанный глиной с соломой, а далее уже слой или два кирпичей на глине. Вот и готово легкое перекрытие. А как быть, когда пролеты были большие. Древние строители прекрасно ориентировались и в этом случае. Устраивались промежуточные опоры, колонны с каменными базами. В этих каменных базах (рис. 60) имелось отверстие, куда и вставлялся нижний конец деревянной колонны. Соскочить со своей базы при землетрясении такая колонна не могла. Шарнир, образованный в нижней части колонны, обеспечивал ее надежную работу, так как изгибающие моменты в колонне возникнуть не могли и она работала только на сжатие. Ранее не упоминалось, но такого же типа каменные базы под деревянные колонны встречаются на Кавказе.

### СТАНДАРТНЫЙ НАБОР АНТИСЕЙСМИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

За свою беспокойную историю Средняя Азия перенесла множество катастрофических землетрясений, о чем свидетельствуют разрушенные города, погребенные под песком. Естественно, что древние мастера с присущей им настойчивостью искали способы предохранять свои сооружения от землетрясений и разработали целый набор конструктивных мер по обеспечению сейсмостойкости своих творений. Зодчие Средней Азии пришли к тому же выводу, как и все остальные их современники и предшественники: только эластичные и прочные материалы и конструкции способны противостоят землетрясениям при соблюдении определенных правил компоновки сооружения. Вспомните строителей Кносского дворца, которые своим жестким каменным конструкциям придавали упругость за счет армирования их деревянными брусками. Идеи у зодчих Средней Азии по вопросам сейсмостойкого строительства были такие же, как у всех, а вот конструктивные воплощения свои, очень оригинальные. Не привязываясь пока почти ни к каким конкретным сооружениям, попробую перечислить типовой набор антисейсмических мероприятий, применяемых зодчими Средней Азии.

Основными вяжущими растворами были ганч и глина, хотя зодчим Средней Азии был известен известковый раствор, но они предпочитали ганч за его прочность и пластичность. Изготавливался ганч из местного алебаstra путем обжига, последующего измельчения и просеивания. Умельцы мастера употребляли ганч крупного помола, который схватывался не так быстро, как ганч мелкого помола, и набирал наивысшую прочность для этого материала через год. Как раствор для кладки в чистом виде ганч почти никогда не применялся, обычно он смешивался с какими-то другими компонентами (с лёссом, песком, древесным углем) еще в сухом виде. Все эти добавки позволяли придать раствору из ганча свойства, нужные строителю в данном месте. Песок и кирпичная крошка были инертными добавками, а вот лёсс замедлял процесс схватывания и повышал вяжущие свойства раствора. Зола добавлялась для повышения во-

достоинства раствора. Глина и древесный уголь смешивались с ганчем для придания связующему веществу повышенных пластических свойств. В одном и том же сооружении требуются растворы с различными качествами. Это прекрасно понимали древние зодчие. Меняя состав добавок в ганч, строители придавали нужные свойства растворам. В мавзолее XII в. султана Санджара в Старом Мерве нижние ряды кирпича уложены на ганче с золой и древесным углем, в средней части — с кирпичной мукой, а в верхней части — ганч с песком. Древние мастера постоянно находились в поиске, совершенствуя раствор, который, казалось, уже обладает самыми совершенными свойствами. В конце концов был получен "шереш" — порошок из высушенных и размолотых корней растений, небольшая щепотка которого на обычный замес ганча в 10–12 кг придавала ему водостойкость и значительно замедляла скорость твердения. Вот на этом прочном ганчевом растворе, обладающем повышенными по сравнению с известковым упругоэластическими свойствами, и возведено большинство сооружений Средней Азии.

Постройка начиналась с рытья котлованов, дно которых на глубину в 60–80 см заполнялось плотной массой сырой гончарной глины без примесей. Такую пластичную глиняную подушку можно наблюдать почти под всеми памятниками архитектуры X–XVII вв. Иногда дно котлована перед укладкой глины утрамбовывалось копытами лошадей. На подготовленном таким образом основании возводился фундамент из обожженного кирпича, как правило, на глиняном растворе. Подошве фундамента придавалась слегка закругленная форма. Глиняная подушка с пластическими свойствами смягчала удар от сейсмической волны. При этом закругленный фундамент легче входил в пластичную массу. Для того чтобы глиняная подушка не высыхала, применялись также специальные меры — всякие засыпки и вымостки. В наше время вместо таких упругоэластических подушек устанавливаются различные слоистые резинометаллические сейсмоамортизаторы.

После выкладки фундамента из кирпича на глине, толстые слои которой также играют роль упругих прокладок, на уровне поверхности земли укладывался ряд кирпича на тощем лессовом растворе, в который входило до 80% песка. Выше уже возводился цоколь сооружения. Вот этот слой тощего раствора под всем сооружением является следующим антисейсмическим мероприятием. Через тысячу лет его назовут скользящим поясом и будут делать из двух пластинок нержавеющей стали или пластмассы. Назначение скользящих поясов — ограничивать сейсмические движения, передающиеся от грунта на сооружение. Если сейсмическая сила превзойдет силу трения по этому поясу, то происходит проскальзывание сооружения и снижается сейсмическая нагрузка. Чем сила трения меньше, тем лучше. Кстати, скользящие пояса из песка применяются в Китае и сейчас, а в Японии между пластинками делают смазку, что значительно снижает сейсмическую силу.

Кладка цоколя закончена. Прежде чем начать возводить стены, поверхность цоколя тщательно выравнивается слоем раствора, на который укладывается камышовый пояс, представляющий собой камыш, уложенный ровным слоем толщиной 8–10 см. Он расположен перпендикуляр-

но плоскости стены. Чтобы поставленные на камыш кирпичи вышележащей стены не раздавили его, каждая камышинка тщательно укладывалась плотно друг к другу. Иногда устраивали два таких пояса, иногда их вообще не делали. Назначение их такое же, как и скользящих поясов и упругих прокладок, — ограничивать движение, передаваемое во время землетрясения от основания на сооружение. Я подумал, какой-бы предложить Вам современный аналог камышовым поясам, первой мыслью было назвать чугунные шары, которые обеспечивают трение качения между зданием и фундаментом, но потом я понял, что это не подойдет. Вот если бы сделать эти шары из прочной резины, то было бы похоже.

На камышовом поясе возводились стены. Конструкция стен была такова, что они сами за счет применявшихся в них податливых растворов делались сейсмоизоляторами. В качестве раствора для стен могла быть использована глина.

В мавзолее Фахраддина Рази (XII в.) стены выложены на глине, а купол на ганче, и мавзолеем стоит до сих пор. Но чаще все-таки стены выкладывались на ганче. В нижней части стены толщина раствора равнялась толщине кирпича (5 см), выше толщина раствора уменьшалась и достигала в верхней части 10–12 мм. Получалось, что объем ганча в общем объеме стены доходил до 30%, что обеспечивало стене из кирпича упругопластические свойства, а это и требуется по условиям сейсмостойкости. На ганче выкладывались все элементы сопряжения стен с куполом и сам купол. Таким замечательным набором антисейсмических мероприятий пользовались зодчие Средней Азии для обеспечения сейсмостойкости своих сооружений [30]. Теперь давайте рассмотрим несколько характерных конкретных сооружений этого региона.

### МАСТЕРА КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ

Если кому-то из Вас удастся посетить древние памятники Средней Азии, взгляните внимательно в узор их кирпичной кладки и Вы увидите перед собой восьмое чудо света. Меня всегда поражают кирпичные орнаменты, вытканые на вонзенных в небо минаретах. Форма минарета — это постепенно сужающийся кверху конус, на котором широкими полосами из цветного кирпича выложены повторяющиеся рисунки. Посмотрите, как равномерно и плавно сопрягаются стены с арками и куполами, при этом часто все замысловатое сооружение сделано из кирпича одного размера. Мечеть XI в. Талхатан-баба находится недалеко от г. Мары, построена вся из кирпича одного размера  $25 \times 25 \times 5$  см [31]. Считается [31], что обожженный кирпич там начал применяться с VIII в. и его форма была выбрана исходя из антисейсмических задач, чтобы обеспечить однородность и монолитность кладки. Я бы сказал, что расположение кирпича в кладке, его узоры, определяются не только эстетикой, но и теми свойствами, которые нужно придать данному участку стены или купола. Существует предание, что древние обжигали кирпич так, чтобы он звенел при ударе по нему, и не просто звенел, а воспроизводил звук "ля".

Давайте начнем наше путешествие в страну кирпича и солнца с Самарканда — города, над которым пронеслись все бури Средней Азии и в

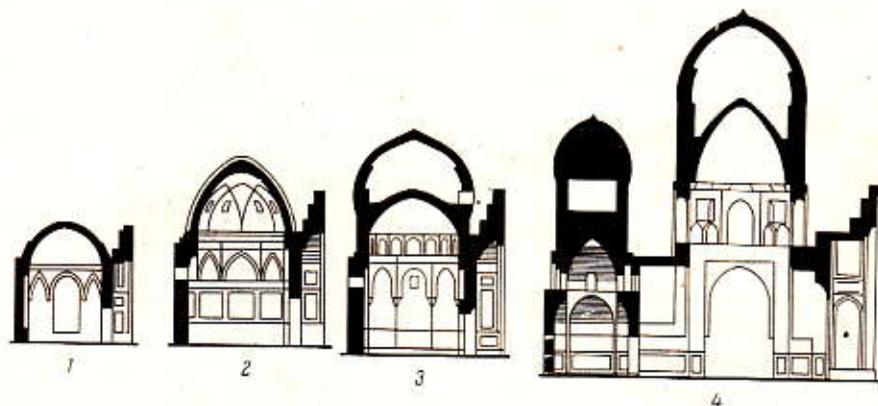


Рис. 61. Эволюция купольных конструкций мавзолеев Средней Азии

древних памятниках которого запечатлелась вся история строительного искусства той эпохи.

Для того чтобы представить, как менялись со временем архитектурные композиции и объемно-планировочные решения древних сооружений и как это влияло на их сейсмостойкость, наверное было бы достаточно рассмотреть комплекс культовых сооружений, который начал формироваться на юге Самарканда в XI в. возле мнимой могилы Кусам ибн Аббаса (Шах- и Зинда – живой царь) и продолжал достраиваться в XV в. Кусам ибн Аббас – личность вполне реальная и значительная, он был двоюродным братом пророка Мухаммеда, явился с первыми войсками арабов в Самарканд в VII в. и тут погиб. Так вот, если вернуться к интересующей нас истории строительства, то, анализируя ансамбль древних архитектурных памятников Шах- и Зинда, можно представить эволюцию архитектуры во всей Средней Азии, разумеется, с некоторыми отклонениями.

На рис. 61 иллюстрируется эволюция купольных сооружений [32]. Первым показан мавзолей Ходжа Ахмада, пропорционально сложенный, умеренных размеров, с небольшим порталом. Купол у этого мавзолея одинарный, с небольшой стреловидностью, распор от него воспринимают стены, усиленные арками, перекрывающие ниши в стенах. Особых претензий с точки зрения сейсмостойкости к этому мавзолею нет. Но все же наличие портала нарушает центричность этого памятника. Совсем ранние мавзолеи были лучше по объемно-планировочным решениям, отвечающим принципам сейсмостойкого строительства. Классическим примером является мавзолей Саманидов в Бухаре, построенный в конце IX в. и предельно простой по композиции [33]. Он представляет собой поставленный на небольшую кирпичную платформу приземистый куб с размерами в плане  $10,8 \times 10,8$  м и высотой 9 м (рис. 62). Стены имеют толщину 1,8 м и, как все сооружение, выполнены из кирпича на ганче. Квадрат стен с помощью арочных тропов переходит в восьмигранник, который плавно сопрягается со сферическим куполом [33]. Вот Вам пример

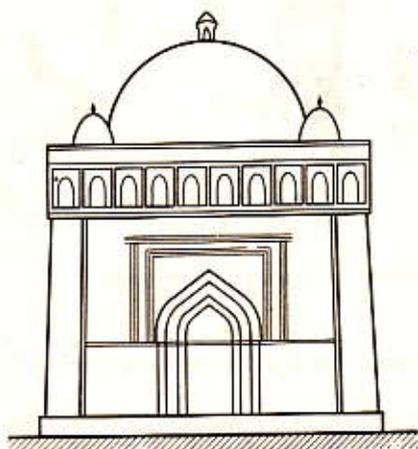


Рис. 62. Идеальная геометрия мавзолея Саманидов

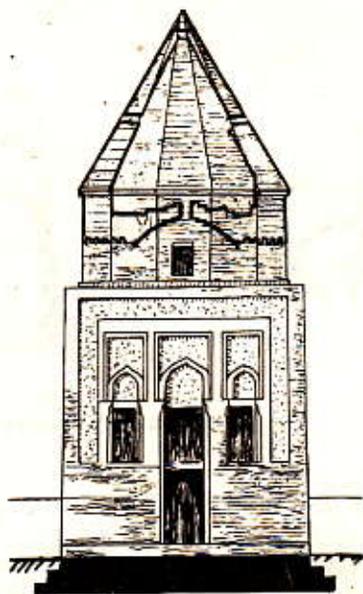


Рис. 63. Плавность сопряжений геометрических фигур мавзолея Фахраддина Рази

идеальных пропорций и размеров, желательных для сейсмостойкого здания жесткой конструкции. Это подтвердила тысячелетняя история существования этого памятника.

Надо сказать, что древних сооружений идеальных пропорций в Средней Азии много. Об их геометрической гармонии подробно рассказано в фундаментальном труде М.С. Булатова [34]. Мне же хочется назвать еще один пропорциональный безпортальный мавзолей, аналога которому нигде в Средней Азии нет [35]. Это мавзолей Фахраддина Рази (XII в.) в Куны-Ургенче (рис. 63), уцелевший после разгрома Ургенча монголами. Мавзолей поставлен на расширяющийся внизу фундамент, имеет внешние размеры в плане  $6,5 \times 6,65$  м, размеры внутреннего квадратного помещения —  $3,63 \times 3,63$  м. Высота слегка сужающегося кверху куба составляет примерно 6,7 м. Куб мавзолея перекрыт внутренним сферическим куполом. Внешний 12-гранный конический купол, выложенный методом ложного свода, т.е. постепенным надвигом камней, опирается на 12-гранный барабан, плавно переходящий в стены. Внутри этого барабана находится массивный внутренний купол. Контур этого купола показан на рис. 63 пунктиром. Внешний и внутренний купола вместе с барабаном образуют единый замкнутый контур, что соответствует одному из принципов сейсмостойкого строительства. Как я уже говорил, стены этого мавзолея выполнены на глине, а купола на ганче. Получается, что жесткая скорлупа куполов опирается на массивное упругопластическое тело,

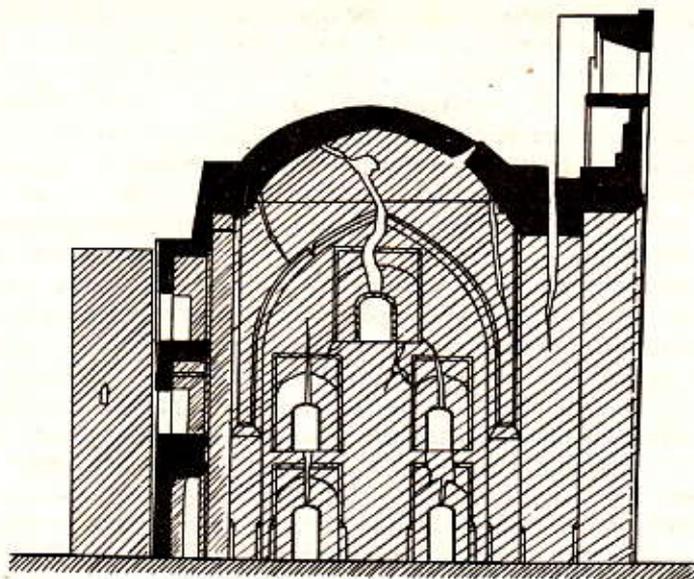


Рис. 64. Предпоследняя стадия разрушения мечети в Анау

которое служит изолятором от колебаний грунта, возбуждаемых сейсмическими волнами. Конструктивная схема очень похожа на ту, какую мы видели, когда изучали храм Гарни.

Вернемся к рис. 61, на котором показана эволюция купольных мавзолеев, начавшаяся с древних центрических мавзолеев. Далее от равных между собой фасадов происходит выделение главного и оформление его в виде пышного, часто очень массивного портала. Появились портално-купольные сооружения, которые теперь уже не являлись центрическими с равномерным распределением масс и жесткостей, что требуется согласно принципам сейсмостойкости. Под вторым номером на рис. 61 показан представитель нового поколения мавзолеев — это мавзолей Шади-Мульк-ака (XIV в.). Увеличился пролет купола и его уже подпирают ребра жесткости, образующие подкупольный каркас. Давление на грунт под фундаментом мавзолея и под его порталом получается различным, под порталом оно, как правило, больше. Это понимали древние строители и увеличивали глубину заложения фундамента под порталом. Здесь явное нарушение принципов сейсмостойкости, так как не соблюдается равномерность распределения масс в сооружении. При таком нарушении место соединения основной массы мавзолея с порталом получается перегруженным и соответственно с этого места начинается разрушение всего сооружения. Пример того мечеть в Анау, которая на самом деле является мавзолеем шейха Джемал-уль-Хак-Уаддина, построенным в середине XV в. (рис. 64). Этот мавзолей, расположенный на невысокой возвышенности близ Ашхабада, построен из прямоугольного обожженного кирпича очень хорошего качества, на ганчевом растворе [36]. Это не помогло, раз-

рушение памятника началось с отслоения портала и трещин в куполе, закончилось полным обрушением при Ашхабадском землетрясении 1948 г.

Следующий этап развития купольных сооружений представлен мавзолеем Ширин-бек-ака, его разрез показан на рис. 61 под третьим номером. Здесь уже применяется двойной купол, внешний и внутренний. При этом форма внешнего купола такова, что он уже является безраспорным. Вот тут-то задаешься поневоле вопросом. Откуда такая форма мусульманских куполов, связано это с религией или с совершенным конструктивным решением. Я думаю, что здесь то и другое. На рис. 65 показан разрез купола в Индии [13], где видно, что это своего рода равновесная система. Здесь, по крайней мере в средней части купола, каждый камень уложен так, что надвиг его внутрь уравнивается утолщением его снаружи. Рационализм древних римских построек уже обсуждался, но это относится ко всему древнему зодчеству. Древний строитель старался создавать прочные, надежные и экономичные сооружения. Помните стрельчатые мусульманские арки, с художественной точки зрения это красиво, а с конструктивной — надежно. При землетрясении образование шарниров в замке или в опорах стреловидной арки не ведет к ее обрушению, а вот круглая арка разрушится скорее (рис. 66). Двойные купола, показанные на рис. 63, образуют замкнутый однородный контур, что, конечно, хорошо с точки зрения сеймики.

На грани XIV—XV вв. в архитектуре культовых и мемориальных сооружений появляются новые существенные изменения. Это связано с появлением мировой империи Тимура со столицей Самарканд, где сосредоточивались огромные богатства, куда доставлялись лучшие мастера со всех концов империи, где имелись огромные армии чернорабочих. Все это создавало предпосылки, когда эволюция купольных сооружений достигла своей высшей точки: от приземистых кубических построек до богато украшенных порталами сооружений и к великолепным стройным мавзолеям с высоко вознесенными на барабанах бирюзовыми куполами, которые появились в эпоху Тимура. Росли размеры сооружений, архитекторы заболели гигантоманией, башни минаретов устремлялись в стратосферу. Сложные задачи по возведению огромных сооружений требуют соответственно развивать строительную технику. Увеличение размеров мавзолеев, невероятная стройность и высота минаретов, большие пролеты куполов, вознесенных на огромную высоту, — все это вступает в противоречие с принципами сейсмостойкого строительства. Это прекрасно представляли зодчие древности и они начинали бороться за сейсмостойкость своих гигантских сооружений. Фундаменты значительно заглублялись, нормой считался фундамент, заложенный на глубину 4–5 м, из камня на специальном водоустойчивом "кыровом" растворе (известь с золой), что обеспечивало надежное основание для мощных порталов и высоких минаретов. Кладка стен из обожженного кирпича на ганче удовлетворяла новым повышенным требованиям, она монолитна, прочна и упруга. Самые большие проблемы возникали с возрастанием пролетов сводов и куполов. Все купола теперь делались двойные, для равномерного распределения нагрузки от большепролетного купола создавалась специальная система кирпичных ребер, передающая нагрузку на стены

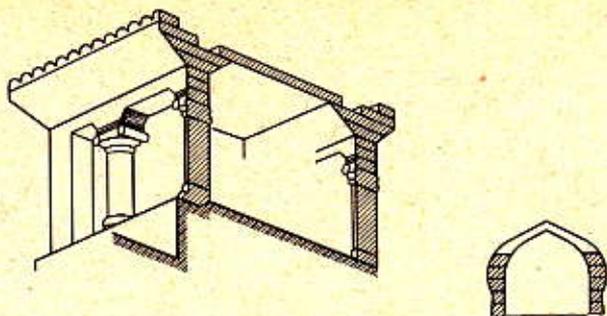


Рис. 65. Самоуравновешенная система перекрытия и купола

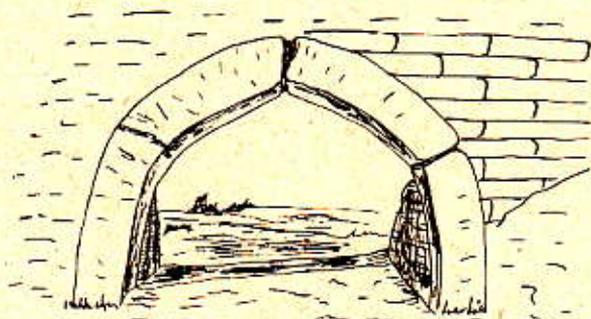


Рис. 66. Сейсмостойкость стрельчатой арки

и внутренний купол. Самым главным являлось то, что была разработана система подпружных арок, поддерживающих свод и барабан купола, которая позволяет создавать обширные внутренние помещения без значительного увеличения диаметра купола. За счет применения этой системы арок снижается вес всего сооружения. Кстати, подпружные арки Средней Азии напоминают двойные пересекающиеся арки Армении, поддерживающие своды, только здесь система гораздо сложнее. Заметно активное стремление значительно понизить вес конструкций, тяжелые своды и купола, раньше выполнявшиеся из кирпича, теперь переводились в тонкостенные конструкции из ганча [33].

В XV в. значительно усложнилась композиция сооружений. Наряду с вознесенными высоко в небо куполами стали строить двухкупольные мавзолеи, в которых проводятся захоронения и есть специальное помещение для выполнения обрядов. На четвертой схеме рис. 61 приведен пример двухкупольного мавзолея XV в., ранее приписываемого Казызаде Руми. Принцип равномерного распределения масс и жесткостей здесь не соблюдается совершенно. Разное заглубление фундаментов, разные купола, поднятые на разную высоту, портал, разная толщина стен, но даже в таком случае можно обеспечить сейсмостойкость сооружения

соответствующими конструктивными мероприятиями. Названный мавзолеей стоит до сих пор [32].

Из уже сказанного понятно, что древние строители прекрасно понимали, какую опасность с точки зрения сейсмостойкости представляет гигантомания в архитектуре. Рост размеров сооружения, повышение центра тяжести всего сооружения за счет вознесения куполов, увеличение пролетов арок и куполов, а тут еще несоблюдение симметрии в многокупольных мавзолееях — все это нарушение принципов сейсмостойкости и соответственно снижение сейсмостойкости строительных конструкций. Уже было рассказано, какие конструктивные приемы применялись для того, чтобы предохранить великолепные мавзолеи нового поколения от землетрясений. Рассмотрим еще один мавзолеей того времени.

После своих блистательных побед над Золотой Ордой Тимур, руководствуясь политическими и религиозными мотивами, повелел построить на месте старой усыпальницы XII в. шейха Ахмеда Ясави новую, невиданной пышности и огромных размеров — в городе Ясы (теперь Туркестан). В обсуждении размеров сооружения и его компоновки участвовал непосредственно сам Тимур. Строительство началось в 1397 г. и велось очень быстрыми темпами, но, отправившись в поход в Китай, в 1505 г. Тимур внезапно умер, строительство прекратилось [37], оно не закончено до наших дней.

Комплекс содержит не только усыпальницу Ахмеда Ясави, но и мечеть, и медресе с библиотекой, и халимхана, где раздавалась еда странникам два раза в неделю, и так далее. Мавзолеей-мечеть Ахмеда Ясави представляет собой огромное, с одной плоскостью симметрии, портално-купольное сооружение. На рис. 67 показан общий вид и план этого сооружения. Его размеры в плане составляют  $46,5 \times 65,5$  м, ширина портала — 50 м, порталная арка имеет пролет 18,2 м. Диаметр самого большого из сохранившихся в Средней Азии кирпичного купола тоже равен 18,2 м. Толщина наружных кирпичных стен достигает 2 м, толщина внутренних стен, на которые опирается центральный купол, — до 3 м.

Начнем с фундамента. Загадка — почему талантливые строители этого замечательного сооружения очень легкомысленно отнеслись к его фундаменту. Обычно фундаменты эпохи Тимура поражают своей излишней прочностью, они складывались из крупных камней на известковом растворе с золой, что придавало им водоустойчивость и прочность. Здесь же под зданием мавзолея не было возведено солидного фундамента. Под его стены на глубину всего 25–30 см было лишь положено несколько рядов небрежной кирпичной кладки, а в котлован под тяжелый портал насыпали крупной гальки с землей [38]. Причина, из-за которой ансамбль Ахмеда Ясави возведен на слабых фундаментах, по-видимому, очень проста и нам должна быть весьма понятной. Владетельный Тимур отправился в путешествие навстречу своей невесте Гукель-Ханым, а тут надо было ехать в сторону, закладывать мавзолеи, — не до этого, настроение плохое, все делается в спешке. Верноподданные стараются угодить, показать товар лицом, здесь уж не до фундамента, скорее надо складывать стены пред светлым ликом начальства. Короче говоря, схалтурил древний строитель, все знал, но обстоятельства оказались сильнее его. К

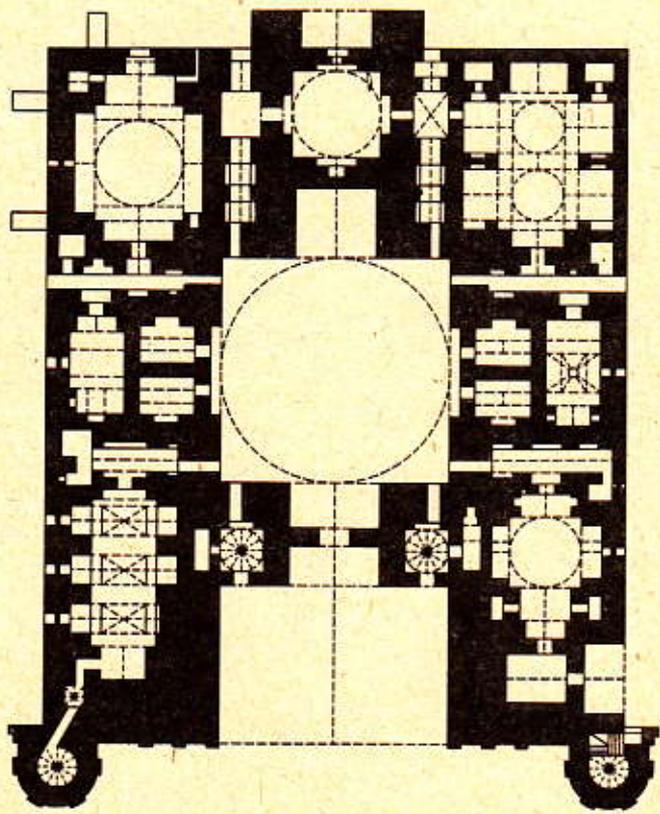
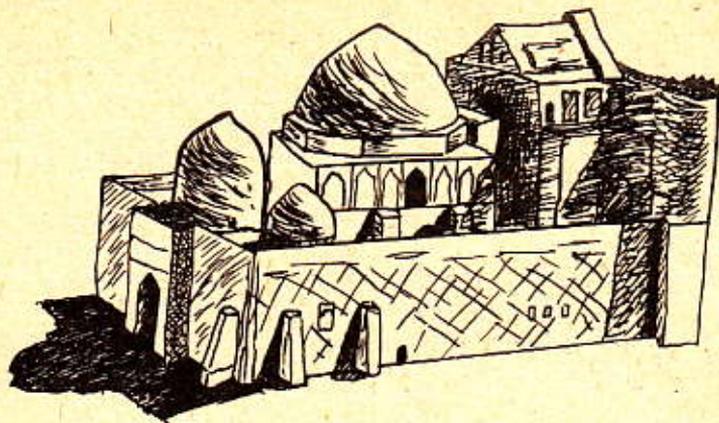


Рис. 67. Усложненная форма мавзолея Ахмеда Ясави и его разрезка на простейшие фигуры

счастью, сильные землетрясения пока не очень беспокоят этот памятник, и все-таки плохой фундамент служит основной причиной его разрушения от неравномерных осадок. Большой вред основанию мавзолея нанесли в 1846 г. кокандские войска, которые, для того чтобы захватить правителя Туркестана Канат-шаха, засевшего в мавзолее, с помощью системы плотин затопили его, и основание мавзолея долгое время стояло под водой.

Но самый главный секрет, обеспечивший сохранность мавзолея Ахмеда Ясави при плохих фундаментах в условиях повышенной сейсмичности и имевшем место в прошлом сильном увлажнении лёссовых просадочных грунтов, заключается в том, что он разрезан на восемь независимых пространственных блоков. Конструктивно антисейсмические швы оформлены в виде четырех сквозных двухэтажных коридоров (см. рис. 69), которые позволяют отдельным частям сооружения независимо двигаться во время землетрясения или при неравномерных осадках, не вызывая дополнительных перегрузок в большеразмерном сооружении.

Несмотря на то что вокруг мавзолея-мечети всегда жили шейхи, наблюдавшие за порядком в нем и справлявшие обряды, строительство его так и осталось незавершенным до сих пор. Например, главный портал не имеет двух минаретов, которые предполагал поставить Тимур, не имеет он также облицовки. Правда, владетель Бухары Абдулла-хан пытался достроить мавзолей в конце XVI в., он свел главную арку портала и сделал кое-что еще [37]. Жаль, что он также не приказал возвести минареты, которые должны были пригрузить портал и облегчить ему восприятие распада от главной арки. В ансамбле была обнаружена арка из обожженного кирпича на неведомом смолообразном растворе с очень высокими упругими свойствами. Раствор этот представляет собой смесь какой-то загадочной смолы с песком и лёссом. Нанесенный на кирпич в подогретом состоянии, он схватывается с ним необычайно прочно, придавая конструкции из такой кладки высокую прочность и повышенные упругопластические свойства. Совершенно ясно, что один только такой раствор, примененный при кладке стен и таких ответственных конструкций, как арки и купола, придает им исключительную долговечность и сейсмостойкость [30]. Из этого просто любопытного примера напрашиваются широкие выводы: творчество древних зодчих состояло из трех элементов, или вернее этапов, во-первых, четко поставленная задача; во-вторых, хорошее знание традиций; в-третьих, поиски нового, для того чтобы еще лучше выполнить задачу. В результате был найден новый невиданный смолообразный раствор.

Над древней Бухарой возвышается минарет Калян. Два раза возводились минареты у соборной мечети в Бухаре и каждый раз они обрушивались, наконец третья попытка увенчалась успехом – в 1127–1129 гг. был возведен минарет Калян (рис. 68) на чрезвычайно прочном и глубоком фундаменте, заложеном на глубину до 10 м, по одним источникам [33], а по-другим – шурф глубиной в 13 м так и не дошел до грунтового основания [34]. Сложен минарет из обожженного кирпича на ганчевом растворе. Современная его высота 46 м, есть предположение, что над фона-

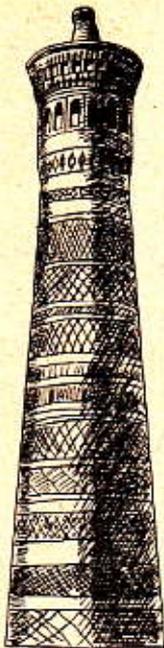
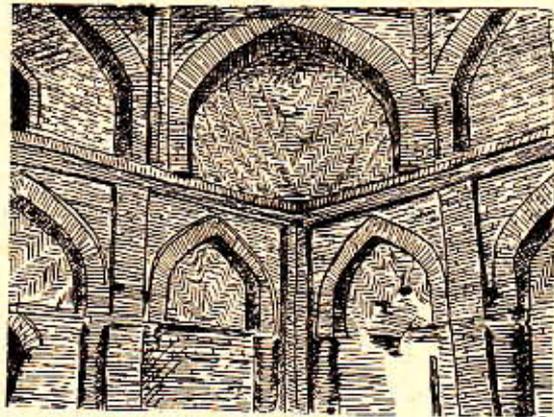


Рис. 68. Позади почти 900 лет естественного отбора

Рис. 69. Сопряжение квадрата и многоугольника



рем, который в настоящее время венчает минарет, было второе звено, упавшее при землетрясении. Диаметр минарета у восьмигранного высокого покоя составляет 9 м. Замысловатое перекрытие над фонарем поддерживают 16 стрельчатых арок, образующих столько же проемов, через которые в былые времена одновременно 16 муэдзинов призывали мусульман на молитву. Минарет Калян в современном виде не назовешь излишне стройным, его довольно быстро сужающаяся кверху коническая форма приземиста. Естественный отбор показал, что форма минарета Каляна сейсмостойка.

Все сохранившиеся архитектурные памятники для нас важны, они дают информацию о требуемой глубине заложения фундаментов, о формах сооружений, желательных для сейсмоопасного района, и, наконец, их динамические характеристики являются теми характеристиками, которые желательны для сооружений, строящихся в данной сейсмоопасной зоне. Больше того, старые рубцы на их боках дают нам сведения о бывших землетрясениях.

Давайте остановимся еще на сопряжении стен и куполов, которое решалось в Средней Азии, как правило, блестяще. Круглые сооружения в средние века там не строились, поэтому приходилось сопрягать квадрат с кругом. Типовой подход, применявшийся в Средней Азии, таков: на квадрат с помощью перекрытия углов арочными тропмами ставился восьмигранник, а он уже сопрягался с куполом. На рис. 69 показано такое сопряжение на примере одного из мавзолеев XI в. [33]. Вы видите, как

облегчены стены нишами, перекрытыми стрельчатыми арками. В простенках между арками заложены ребра жесткости в виде колонн, утопленных в стену. Выше расположена новая система из арок, образующих восьмигранник. Далее идет сам купол, который постоянно на протяжении веков совершенствовался, облегчался и упрочнялся.

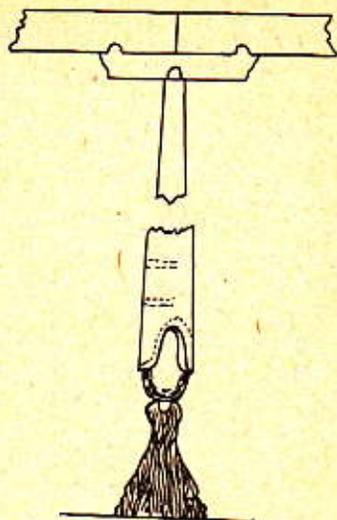
Вот еще любопытный момент. Обратите внимание, как широко использовались в древнем мире различные криволинейные конструкции: арки, своды, купола. Все эти хорошо построенные конструкции показали свою долговечность, надежность и в то же время украсили монументальные сооружения. В настоящее время эти конструкции используются редко, все до предела упрощено.

### МНОГОШАРНИРНАЯ КОЛОННА

Каменных колонн в сохранившихся сооружениях не осталось, хотя известно, что попытки применить их были. В соборной мечети Тимура, называвшейся Биби-Ханым и имевшей гигантские размеры (83×62 м), было применено 400 мраморных колонн высотой более 4 м. Эту мечеть постигла печальная участь, при землетрясении она рухнула. Были, по-видимому, и другие неудачные примеры использования каменных колонн, во всяком случае зодчие явно относились к ним с большим недоверием. Учитывая сейсмическую опасность района и принцип эластичности, они не могли применять жесткие каменные колонны. Кирпичные столбы применялись как промежуточные опоры, так как известными способами с помощью раствора им можно было придать эластичность. Кирпичные столбы устраивались значительной толщины (порядка 80 см), при этом кладка велась на толстых слоях скрепляющего ганчевского раствора. Особенно широко они использовались на ранних объектах в XI в. Позднее и от них отказались [30].

Зато в Средней Азии применялась, применяется и будет применяться легкая деревянная колонна, обладающая совершеннейшими конструктивными качествами (рис. 70). Прежде всего у нее имеется красивая резная расширяющаяся к низу каменная база. В верхней части каменной базы имеется отверстие, куда вставляется нижний шип легкой деревянной колонны, постепенно сужающейся вверх. Верхняя часть колонны также снабжена шипом, вставляемым в подбалку. Подбалка сама на концах снабжена шипами, на которые одеваются балки перекрытия. Смотрите, что получилось: колонна с обоих концов снабжена шарнирами, следовательно, она будет работать только на сжатие без изгиба, и соответственно ее материал будет загружен равномерно. Применение подбалки снижает величину пролета между колоннами и этим значительно снижается максимальный изгибающий момент в несущих балках. Ко всему прочему наличие шипов не позволит всей конструкции расползтись, элементам соскочить один с другого при той тряске, которая возникнет во время землетрясения. Наконец, самое главное — двухшарнирные колонны не будут передавать на перекрытие те движения грунтового основания, которые возникнут при землетрясении. На перекрытие будут передаваться горизонтальные движения только от стен, которые и долж-

Рис. 70. Многошарнирная колонна



ны воспринимать эту горизонтальную нагрузку. Рассматриваемая замечательная колонна широко применяется в среднеазиатском строительстве. Она служит для поддержания легких деревянных перекрытий над широко распространенными традиционными открытыми террасами, айванами. Но эта же колонна использовалась в монументальном строительстве. Знаменитая Джума-мечеть в Хиве была основана в X в., она имеет размеры в плане 55×46 м и высоту до 5 м, в нее вмещалось все мужское население города при пятничных богослужениях. Плоское балочное перекрытие Джума-мечети поддерживают 212 колонн указанной конструкции, четыре из них древние, отличаются резьбой особой красоты и относятся еще к X—XI вв. [39]. Как видите, Джума-мечеть подтвердила сейсмостойкость этой конструктивной схемы своим тысячелетним существованием. А схема эта чрезвычайно проста: совершенно нет жестких узлов, легкое гибкое деревянное перекрытие, все соединения шарнирные, небольшие горизонтальные нагрузки передаются на стены, расположенные по периметру.

По аналогии вспоминается другая, очень похожая по идее схема, которая существовала в то же время за много тысяч километров в Японии, где, учитывая высокую сейсмичность территории, до XVI—XVIII вв. вообще все строили из дерева, так как прекрасно понимали, что дерево легкое, упругое, прочное — идеальный материал для сейсмостойких конструкций. В Японии в жилом строительстве существовала такая конструкция [22]. На выровненный слой гравия устанавливались крупные камни, которые служили основанием под тонкие деревянные колонны. В верхней части камней были просверлены отверстия, куда и вставлялись деревянные стойки, образуя основу всего здания. Эти стойки несли легкую кровлю и между ними были устроены легкие стены из дерева и бумаги. Конечно, это была весьма сейсмостойкая конструкция, каждая каменная база двигалась по-своему, в соответствии со сложным движением грунта при землетрясении, и в самом худшем случае мог произойти только разрыв гибких связей между стойками.

Раз уж мы заговорили о сейсмостойкости деревянных конструкций, давайте займемся этим вопросом подробнее, отправимся в царство дерева.

## В ЦАРСТВЕ ДЕРЕВА

### РУССКАЯ ИЗБА И ЯПОНСКАЯ ПАГОДА

Вспомните, как устроена обыкновенная русская изба, конструкция которой отработывалась в течение нескольких столетий, при этом заботились главным образом о ее долговечности и теплоизоляции, а о ее сейсмостойкости вряд ли кто думал (рис. 71). Хотя с освоением русскими Сибири и Дальнего Востока русская изба шагнула в Забайкалье, на Алтай, в Казахстан, в районы повышенной сейсмической активности, где при землетрясениях она показала себя с самой хорошей стороны. Основу всякой русской избы составляет так называемый сруб, который собирается из горизонтально расположенных отдельных, тщательно пригнанных друг к другу бревен. При этом перед установкой в каждом бревне снизу вырубается по всей длине паз, а сверху ребро. На концах каждого бревна, там, где примыкают поперечные стены, вырубается поперечные пазы. В результате при установке каждого бревна в сруб оно сцепляется с нижележащим бревном и с поперечными стенами, образуется единая неразъемная система, из которой нельзя выбить ни одно бревно, не сломав всей стены. Такой сруб может свободно деформироваться в любом направлении за счет сдвигов одного бревна относительно другого по пазам. Такая система, естественно, обладает хорошим затуханием, материал ее легок, прочен и упруг. Конструкция симметрична. То, что рубленые русские избы обладают высокой сейсмостойкостью, подтвердили многие землетрясения. При Иркутском землетрясении 7 ноября 1958 г. интенсивностью 8–9 баллов рубленые дома пострадали меньше всех, только в отдельных появились щели в углах. При Верненском землетрясении 1910 г., интенсивность которого была больше 9 баллов, рубленые дома с хорошим каменным фундаментом под всем домом не пострадали вообще [40]. А как можно усовершенствовать конструкцию русской избы? Ей надо дать вертикальные связи, которые даже при очень сильных толчках не позволили бы бревнам выскочить из пазов, а венцам сруба соскочить один с другого. Например, в углах сруба на всю высоту пропустить металлические стержни, закрепив их внизу иверху. Конструкция, в которой для повышения сейсмостойкости дерево армируется металлом, была предложена в начале нашего столетия, а где и для чего вы узнаете ниже, а сейчас кое-что о японской пагоде.

В очень древние времена в Японии был введен обычай – заново через каждые 20 лет перестраивать храмовые комплексы из дерева, при этом строилась копия с соблюдением малейших деталей. Не всегда этот интервал времени соблюдался, но тем не менее точные копии строились, и этот обычай позволяет нам и сейчас изучать полную конструкцию некоторых древнейших архитектурных памятников, находящихся в прекрасном состоянии. Рассмотрим один из древнейших памятников деревянного зодчества Японии, которое было деревянным до XVIII в. Это прямоугольное в плане святилище Содэн (рис. 72), входящее в храмовый комплекс Иса-найку, посвященный богине Солнца – Аматерасу-оми-ками и построенный в III в. н.э. [22]. Вот уже по этому древнейшему сооружению видно

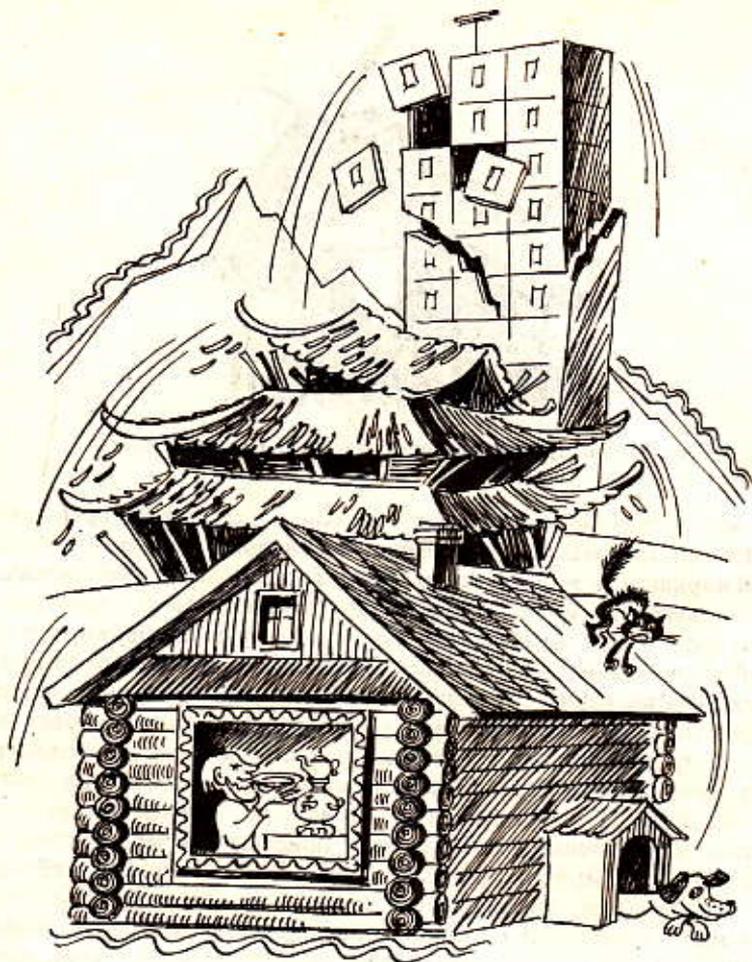


Рис. 71. Кто самый сейсмостойкий?

принципиальное конструктивное отличие японских деревянных зданий от русской избы. В японских основой всего здания являются врытые одним концом в землю вертикально поставленные столбы, на них уже нанизывается вся остальная конструкция. В русской избе все повернуто на  $90^\circ$ , бревна лежат горизонтально и между ними устроены вертикальные и горизонтальные связи. При этом имеющиеся связи отличаются высокой податливостью (бревна по направляющим могут скользить друг относительно друга) и повышенным коэффициентом затухания. Единственный недостаток состоит в том, что вертикальные связи не работают на растяжение, соответственно при землетрясении венцы могут соскочить один с другого. Чтобы этого не было, необходимо ввести дополнительное вертикальное обжатие или хотя бы закрепление.



Рис. 72. Конструктивное совершенство святилища Содэн

Так вот, в святилище Содэн вертикально поставленные бревна-колонны связаны продольными и поперечными связями в единый пространственный каркас. Как видите, все сделано согласно принципам сейсмостойкости. Больше того, имеются две мощные стойки, поставленные по главной оси сооружения, вынесенные наружу, которые поддерживают здоровенный продольный коньковый брус. Две стойки и лежащий на них брус образуют чрезвычайно прочную П-образную раму. Эта рама связана с пространственным каркасом всего сооружения, поддерживает его и придает ему еще большую способность противостоять землетрясениям. По-видимому, рама и каркас имеют различную жесткость, при этом рама более жесткая. Такое соединение в единую конструктивную схему элементов с различными жесткостями присуще сейсмостойкому строительству древней Японии. Далее еще будет приведен пример сейсмостойкой конструкции, состоящей из двух систем различной жесткости. Такого нигде мы раньше не встречали. А теперь обратите внимание еще на один типовой элемент сейсмозащиты в святилище Содэн, который использовался не только в Японии, а и во многих странах Юго-Восточной Азии. Святилище довольно основательно поднято над землей на столбах, зарытых в землю с одного конца и связанных с каркасом с другого. Вот эти-то столбы и служат сейсмоизоляторами. В уровне грунта они между собой не связаны, следовательно, они могут двигаться независимо, в соответствии со сложным хаотическим движением грунта во время землетрясения. Кроме того, сами они обладают некоторой гибкостью и поэтому как бы смягчают удары подземной стихии. В уровне пола здания святилища имеется их общая связка, куда входит и обходная терраса, где амортизированные движения от каждой опоры суммируются и усредняются. Кровля легкая, выполнена из тщательно уложенной и причесанной соломы. Как видите, буквально все принципы сейсмостойкого строительства соблюдены в этом сооружении.

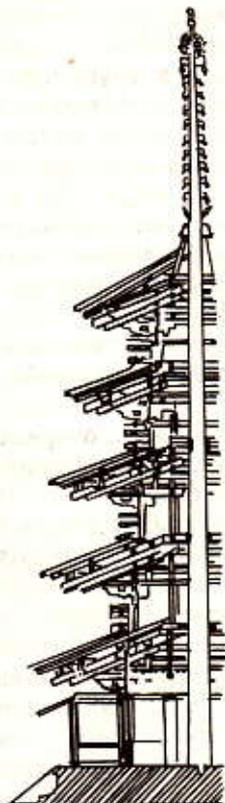
Можно и еще привести пример конструкции деревянного сооружения, поднятого на столбах. По горизонтальной укладке бревен стен оно

напоминает русскую избу. Только в нем нет пазов и бревна стен не зацепляются одно за другое, а согласно своему предназначению очень точно друг к другу пригнаны. В сухую погоду древесина высыхает и внутренности помещения проветриваются, в сырую же дерево набухает и закрывает доступ внутрь сырого воздуха. Это сокровищница Сёсоин, находящаяся в древней столице Японии Наре и построенная императором Сёму в 752 г. (рис. 73). Прямоугольное в плане здание опирается на 40 деревянных колонн высотой 2,7 м, укрепленных железными обручами. На оголовки колонн уложены балки, образующие перекрестную систему связи, как это видно на рис. 73. Стены сокровищницы поддерживают двухскатную кровлю и представляют собой сруб из трехгранных в сечении брусьев. Сокровищница Сёсоин разделена на три части внутренними перегородками, устроенными из бревен и связывающими продольные стены между собой [22]. Работа такой конструкции при землетрясении идеально проста: опорные колонны, заделанные в грунт, двигаются независимо, связующая их верхушки перекрестная система балок и само здание настолько гибки и податливы, что, не напрягаясь и не разрушаясь, могут двигаться и дышать так, как двигаются и дышат верхушки сравнительно гибких опорных колонн.

В 621 г. буддизм получил официальное признание и стал господствующей религией в Японии, но уже в 577 г. сюда прибыли первые специалисты по строительству буддийских храмов из государства Пяччэ на Корейском полуострове, и дальше в Японии широко использовалась не только общая композиция храмовых комплексов, но и целые сооружения и их детали, свойственные зодчеству Китая [22]. С этого времени в Японии получили распространение деревянные пагоды в виде башенных сооружений, достигавших высоты 30 и даже 50 м. Все они строились по отработанному веками одному и тому же принципу (рис. 74). Вся конструктивная система состоит из нескольких квадратных в плане ярусов, постепенно уменьшающихся по высоте и образующих ступенчатый каркас. Каждый уступ перекрывается односкатной крышей, получается как бы многоэтажное сооружение, но используется только пространство первого яруса, а назначение остальных ярусов — подчеркивать значимость всего сооружения. Каждый ярус устроен таким образом, что стоящие по периметру столбы поддерживают замкнутый пояс, состоящий из нескольких рядов бревен, уложенных венцом, как в русских избах. Эти пояса являются опорой для столбов следующего яруса, и так до самого верха. Вот эти уложенные венцом бревна в уровне каждого перекрытия пагоды являются с современной точки зрения не чем иным, как антисейсмическим поясом, назначение которого — дать горизонтальную обвязку элементам перекрытия. Кстати, русскую избу также можно считать одним сплошным антисейсмическим поясом. Хорошо, конечно, что пагода имеет форму постепенно сужающейся пирамиды, но плохо то, что ее конструкция значительно усложнена разорванностью в уровне каждого яруса вертикальных стоек. С точки зрения сейсмологии есть еще один крупный недостаток в конструкции пагоды — значительное утяжеление всего сооружения за счет тяжелой кровли из глиняной черепицы. Но все эти недостатки компенсируются тем, что пагода представляет собой

Рис. 73. У этого храма проблем с сейсмостойкостью нет

Рис. 74. Разрез пагоды с гибким сердечником



конструктивную схему, состоящую из двух систем различной жесткости. Описанная конструкция из ярусов с тяжелой кровлей является гибкой системой. В середину ее вставлена еще более гибкая система, выполненная в виде столба из гигантского ствола дерева или составленная из нескольких частей. Этот столб пронизывает все ярусы башни и выступает над крышей в виде шпиля, на котором традиционно укрепляется девять бронзовых колец. Нижней частью столб опирается на каменное основание и укрепляется в нем шипом, буквально как в среднеазиатских колоннах. Внешний каркас и внутренний гибкий столб соединены между собой только в уровне двух ярусов. Вся пагода стоит на каменном основании. Один из секретов исключительной сейсмостойкости и способности противостоять тайфунам этих пагод в том и заключается, что они состоят из двух систем различной жесткости. Землетрясения и тайфуны (как воздействия динамические и имеющие каждый свои преобладающие периоды колебаний) будут сильнее воздействовать на какую-то одну систему, гибкую или более жесткую, в зависимости от того, к какой ближе их периоды. В этом случае другая система, как бы противоположная, будет меньше раскачиваться и служить гасителем колебаний для первой, затрудняя ее раскачивание. Для конструкции с такой двойной

системой необходимо, по-видимому, стремиться к тому, чтобы собственные периоды колебаний гибкой и менее гибкой частей отличались существенно. С этой точки зрения древние строители поступали, может быть, очень мудро – утяжеляли кровлю каркасной системы пагоды, увеличив этим значительно ее собственный период колебания, а центральный гибкий ствол закрепляли в трех точках, что приводило к высшим формам колебания с маленькими собственными периодами. Таким образом они добились большой разницы в периодах собственных колебаний двух систем, составляющих пагоду. Результат известен, сейсмостойкость пагод подтвердила их многовековая история, соответственно я был не прав, утверждая выше, что тяжелая кровля пагоды – нарушение принципов сейсмостойкости. Я размышлял стандартно, а древние строители подходили творчески. Для примера на рис. 74 показана пагода храмового ансамбля Якусидзи, построенного в 680 г. Пагода трехъярусная, а производит впечатление шестиярусной за счет обходных галерей, устроенных между ярусами. Центральный круглый столб свободно стоит на каменном фундаменте и имеет диаметр 0,9 м. Высота башни до шпиля составляет 35 м [22].

В монастырские архитектурные комплексы входили также здания храмов. Они, разумеется, также возводились из дерева на каменном основании. Были эти храмы, как правило, одно- и двухэтажные, такой же сложной структуры, как пагоды, только без центрального гибкого столба, но обвязка в виде венцов бревен в уровне перекрытий очень похожа. Опирающие деревянные балки на колонны выполнялось в виде набора подбалок, образующих пространственный шарнир. Вообще все сопряжения горизонтальных и вертикальных, а также наклонных элементов выполнены шарнирно, в результате образуется чрезвычайно податливая система, буквально механизм, опирающийся на прямоугольную сетку колонн первого яруса. Хорошо бы это проверить, но я подозреваю, что вся эта шарнирно соединенная каркасная система, выведенная из положения равновесия землетрясением, возвращается в исходное положение силой собственного веса, т.е. мы здесь имеем дело с очень оригинальной системой сейсмозащиты.

Интересным является двухэтажный главный храм – “кондо” в монастыре Хорюдзи в Наре, строительство которого было закончено в 607 г. В качестве элементов сейсмозащиты продолжает применяться прямоугольная сетка свободно стоящих столбов, на которых поднимается над землей само сооружение, подобно тому как это было показано на рис. 72. Таким сооружением является уже упомянутая сокровищница Сёсоин в Наре (см. рис. 73), сложенная из венцов, подобно русской избе, и поднятая на столбах довольно высоко над землей. Тогда же, в VIII в. было сооружено гигантское деревянное здание Дайбуцудэн (зал Великого Будды), относящееся к архитектурным памятникам нарского периода. Его размеры в плане составляют 87×50 м, высота 49 м. Около этого сооружения стояли две пагоды высотой по 97 м. Этот зал Великого Будды сохранился до наших дней. Две его крыши были подняты высоко над землей на каркасной системе, нижнюю часть которой образуют несвязанные между собой деревянные колонны, которые и работают как сейсмо-

изоляторы. Основанием этому сооружению служит сплошная каменная платформа под всей конструкцией. Как работает такая платформа в условиях сеймики мы уже обсуждали.

Теперь перейдем к изучению почти такой же гигантской конструкции из дерева, как зал Великого Будды. Это наша, Российская конструкция на каменной платформе, сооруженная более тысячи лет спустя.

### ДЕРЕВЯННЫЙ КАФЕДРАЛЬНЫЙ СОБОР

Я хочу рассказать об исследовании одного не очень старого (ему скоро будет сто лет), но удивительного и малоизученного сейсмостойкого сооружения. В 1904 г. в г. Верном (ныне Алма-Ата) был заложен Софийский Кафедральный собор, а в 1907 г. он был уже освящен. Узнал я об этом соборе из книги Ю.О. Домбровского [41] "Хранитель древностей". В этом художественном произведении Ю.О. Домбровский подробно описывает свой приезд в Алма-Ату в 30-е годы, впечатления от Кафедрального собора и разговор со сторожем этого собора, старым казаком, который впервые рассказал ему о знаменитом русском военном инженере А.П. Зенкове, построившем этот собор и восстановившем г. Верный после сильнейшего землетрясения 1887 г. Разговорчивый сторож рассказал Ю.О. Домбровскому легенду, что собор был построен без единого гвоздя из тянь-шаньских елей.

Первое сильное землетрясение в г. Верном произошло в 1887 г. Кроме предварительных незначительных толчков, которые заставили жителей покинуть помещения, произошло еще два сильных удара с интервалом времени в 10 мин. Сильнее всего пострадали здания из различных видов кладки, особенно из сырцового кирпича, рухнула кирпичная церковь, разрушилось 1,8 тыс. таких зданий. Зато 800 деревянных зданий, оказавшихся в городе, уцелело, в них разрушались только кирпичные трубы и печи. Нетрудно сделать вывод, что деревянные здания являются более сейсмостойкими, чем каменные. В 1889 г. были изданы "Меры, указанные Техническо-Строительным комитетом, которые необходимо применять в городских поселениях Семиреченской области". В этих указаниях рекомендовалось строить, как правило, деревянные сооружения на каменном фундаменте с подвалом под всем зданием и усилением углов вертикальными брусками. Вспомните о вертикальных связях, которые нужно устроить в русской избе, чтобы она стала самым сейсмостойким зданием в мире. После этого землетрясения город был восстановлен в деревянном варианте [42].

Следующее землетрясение в 1910 г. было еще более сильным. Смещения почвы в Пулково под Петербургом достигали 4 мм. При этом землетрясении ни одна деревянная постройка не была разрушена, в том числе и построенный к этому времени громадный Кафедральный собор. Опять разрушались только кирпичные печи. Люди и скот погибли только в горах на пастбищах под обвалами. Город уцелел, и в этом не могла быть заслуга одного человека, даже такого выдающегося, как А.П. Зенков. Как мы теперь научились понимать, все в таких случаях зависит от системы. В Армении с ее традиционным сейсмостойким строительством



Рис. 75. Многоглавый деревянный собор

много прекрасных строителей, а города Лениканан и Спитак в 1988 г. превратились в развалины и полностью не восстановлены до сих пор.

Мне повезло, когда на работе предложили лететь в Алма-Ату и рассказать об итогах Армянского землетрясения. Я сразу согласился, так как решил, что это судьба, увижу собор, а может быть, что-нибудь детальнее узнаю о нем. Прилетев в Алма-Ату, быстро расправился с делами и уже во второй половине дня отправился посмотреть собор. Вошел в парк и за деревьями увидел знакомые по фотографиям контуры собора. Передо мной стояло яркое, играющее всеми цветами радуги, пестрое, многоглавое сооружение в псевдорусском стиле. Этот стиль как раз был в моде в конце прошлого столетия, когда создавался проект этого собора. Когда вошел внутрь, передо мной было огромное внутреннее пространство, равномерно и ярко освещенное через широкие окна подкупольных барабанов. Снизу видны были загадочно узкие простенки между этими окнами. Мелькнула мысль: как обеспечивается прочность этих тонких простенков при землетрясении, они же должны удерживать массу купола. Возникли и другие вопросы. Здесь мне удалось добыть крохотную брошюрку с неразборчивым шрифтом на желтой бумаге [43], содержащей некоторые полезные для меня сведения.

По поводу высоты Кафедрального собора в литературе существуют самые фантастические цифры: называют и 56 м, и 54 м [42], где-то я видел даже 59 м. По чертежу разреза собора самая высшая отметка на верхнем конце креста на главном куполе – 39,63 м, то же самое на верхушке колокольни – 44,2 м, отметка верха каменной плиты основания – 0,55 м. Как видите, даже до 50 м далеко, но и 40 м для деревянного сооружения не плохо (рис. 75).

Двухскатную стропильную крышу собора украшают пять куполов с луковками и крестами, приподнятыми на восьмигранных приземистых барабанах с широкими прямоугольными оконными проемами. Диаметр центрального большого купола приблизительно 13 м, четырех маленьких угловых куполов приблизительно 6,5 м. По оси собора над главным входом имеется еще колокольня прямоугольной формы в плане. Все эти выступающие над крышей купольные конструкции объединены пространственным каркасом крыши в единую систему, которая, в свою очередь, соединена и опирается на стены и каркас самого здания. Венцы

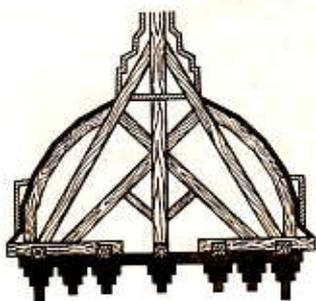


Рис. 76. Безраспорный купол собора

стен и замкнутые каркасы здания, стропила крыши — все это выполнено из тьянь-шаньской ели. Теперь поговорим о конструкции отдельных элементов собора.

Практически сферические легкие деревянные купола с внутренним каркасом сделаны безраспорными (рис. 76), так как весь распор от них воспринимается кессонным плоским потолком, устроенным в нижней части купола и выполненным из мощных балок, пересекающихся под прямым углом. Эти потолки и их конструкция видны снизу из внутренних помещений собора. Купол и кессонный потолок образуют единую замкнутую пространственную систему. Этот достаточно легкий объем опирается на барабан и связан через простенки с крышей. Как устроены узкие простенки купольных барабанов, я не смог выяснить, попробуем разгадать это через известную конструкцию колокольни.

Основу колокольни представляет сруб из уложенных горизонтально, венцами, бревен, буквально как в русских избах. Сруб получился довольно высоким, и учитывая, что при землетрясении в высокой колокольне появляются изгибающие моменты, а следовательно, и растяжение, плохо работающий на растяжение сруб не сможет удержать шатер колокольни. Далее все ясно, нужно вводить дополнительные вертикальные связи. Строитель собора так и сделал, он ввел даже три вида вертикальных связей. Прежде всего к бревнам прибили снаружи облицовку из толстой доски. Так как стены оказались ослабленными 12 оконными проемами, было установлено 16 пар толстых брусьев, проходящих внутри на всю высоту колокольни, в углах и простенках. Это второй вид вертикальных связей. Был введен и третий, пожалуй, самый главный вид

связей: весь сруб был прошит восемью сквозными вертикальными болтами [43]. Они захватывают сруб колокольни, включая высокую пирамидальную крышу, и связывают их с верхними венцами и каркасом всего здания. Это те усовершенствования, которых не хватало русской избе, для того чтобы стать самым сейсмостойким зданием всех времен и народов. При вертикальных связях колокольню уже нельзя разорвать на куски или оторвать от всей замкнутой структуры здания даже при очень сильном сейсмическом воздействии, и что показало землетрясение 1910 г. Сомневаться, я думаю, особенно не приходится, что конструкция подкупольных фонарей должна быть точно такой же, купольные объемы металлическими стержнями пришиты к корпусу самого здания. Во всяком случае во время того же землетрясения 1910 г. купола сильно колебались, об этом свидетельствуют согнутые тогда на куполах кресты, но разрушений не было. Разумно было бы точно так же прошить стены здания и его каркас, но было ли это сделано мне выяснить не удалось.

Теперь о фундаменте. Здание собора стоит на плите из бута на известковом растворе. Плита облицована гранитом, из гранита же сделан цоколь здания. Конструктивно получается точно так же, как у японских пагод: деревянная конструкция стоит на каменной плите, но здесь есть один очень любопытный элемент — кольцевая подземная галерея, окружающая весь фундамент. Назначение этой галереи, говоря современным языком, — отражать поверхностные сейсмические волны. Известно, что дом А.П. Зенкова также был окружен канавой и это действительно было эффективным устройством против землетрясений, так как его дом колебался меньше других. Точно такое же антисейсмическое мероприятие было применено по отношению к собору. Думаю, что его придумал не А.П. Зенков, истоки лежат где-то в среднеазиатских традициях. Как аналог напрашивается пример — древнейший и самый большой город майя — Тикаль (VI в. до н.э. — VI в. н.э.) на п-ове Юкатан в Северной Америке. Этот полуостров знаменит своей высокой сейсмической активностью [6]. Раскопанная центральная часть города состоит из девяти больших групп зданий, расположенных на искусственных возвышенностях, разделенных глубокими впадинами. Для чего устроены эти впадины? Может быть, это антисейсмическое мероприятие?

При землетрясении самым активным образом колеблется верхний слой грунтовой толщи, а в глубину эти колебания довольно быстро уменьшаются. Когда же на пути распространяющихся поверхностных волн встречаются рвы и канавы, волны отражаются от их стенок и получается, что сооружение, окруженное рвом, находится как бы в зоне затишья. Таким образом, галерея вокруг фундамента собора — это тоже антисейсмическое мероприятие. Все это и обеспечило Кафедральному собору в г. Верном замечательную сейсмостойкость. Здесь воплощены все принципы сейсмостойкости, а против такого нарушения, как многочисленные выступающие купольные конструкции, приняты соответствующие меры.

## ВСЕ ОСТАВШЕЕСЯ ДЕРЕВО

Могу еще раз напомнить, что из традиционных строительных материалов дерево по своим качествам самый сейсмостойкий материал. С ним могли соперничать только войлок, как материал для казахских юрт, и шкуры животных, из которых строились яранги чукчей. В настоящее время у дерева появились новые достойные соперники. Это прочные, упругие, легкие, способные принимать любую форму пластмассы, а также пневматические конструкции, основой которых является обыкновенный воздух. И все-таки еще немного о древних деревянных конструкциях.

Одна из древнейших конструкций, основу которой составляло дерево и которая применялась везде — в Египте, Индии, на Кавказе, в Китае и применяется в настоящее время, представляет собой здание с деревянным каркасом и заполнением из глины, смешанной с соломой или шерстью животных. При хорошо выполненном каркасе и легкой кровле такие здания отвечают всем требованиям сейсмостойкости и хорошо выдерживают сильнейшие землетрясения. Вообще древние строители понимали толк в дереве, не зря много раз уже упоминалось армирование деревом кирпичных и каменных конструкций.

В этом разделе хотелось бы рассказать о замысловато задуманных сейсмостойких конструкциях из дерева. Вообще деревянных сооружений, вычурно оформленных, богато украшенных резьбой, много в Юго-Восточной и Восточной Азии. Рассмотрим только самые интересные. Обратим внимание на небольшой комбинированный из дерева и камня храм Мот Кот во Вьетнаме, возведенный в 1049 г. Этот храм построен так, что основанием ему служит одна толстая круглая каменная колонна. Из этой колонны выступает восемь наклонных деревянных консолей, на которые опираются деревянные колонны, поддерживающие храм и входящие в каркас всего здания (рис. 77) [22]. Получилось здание с точечным опиранием, при этом идея точечного опирания доведена до идеала или до абсурда, как Вам лучше нравится. Проанализируем, что дает с точки зрения сейсмостойкости опирание здания на одну колонну, погруженную глубоко в грунт. Во-первых, поверхностная сейсмическая волна такому зданию не страшна, так как оно опирается на такие глубокие отметки, где попросту поверхностных волн нет. Значит, как у протяженного здания, проблемы учета неоднородного движения сейсмического поля под сооружением здесь нет. Во-вторых, на это здание ввиду точности его опирания не будет передаваться кручение за счет неоднородности сейсмического поля. В-третьих, по высоте фундамента (колонны) будут осредняться объемные сейсмические волны и колебания этого столба в вертикальной плоскости будут очень незначительными. Таким образом, конструкция фундамента в виде глубокозакопанного в землю столба является антисейсмической, только сложновато, например, 16-этажную башню посадить на такой столб.

В Китае применялась стоечно-балочная система, образующая двухскатные крыши. В отличие от европейских наклонных стропил, которые создают распор, здесь использовалась такая конструкция крыш (рис. 78), что распор не возникал, но значительно утяжелялось перекрытие.



Рис. 77

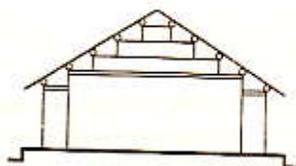


Рис. 78

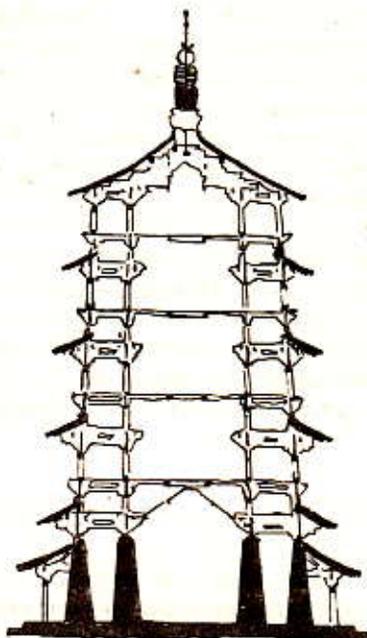


Рис. 79

Рис. 77. Деревянный храм Мог Кот на каменной колонне

Рис. 78. Безраспорная конструкция кровли

Рис. 79. Пагода Шицзята — виброгаситель, 1056 г.

Единственная сохранившаяся до нашего времени деревянная пагода Сакья Муни монастыря Фогунсы, построенная в 1056 г. в провинции Шаньси (рис. 79) [22]. Восьмигранная в плане пагода достигает высоты 66,6 м. На доске у ее основания написано "Дьявольское мастерство, божественное искусство". На всю высоту первого этажа, по-видимому, из кирпича выложены два восьмигранника, образующие стены внутренних помещений, на которые уже опираются деревянные конструкции верхних этажей пагоды. Все узлы каркаса пагоды податливые, их шарнирные устройства таковы, что получают более гибкими, чем в японских пагодах. Все девять этажей могут свободно смещаться друг относительно друга в любом направлении. Но изюминка в том, что на самой верхушке крыши имеется небольшая кирпичная площадка, на которую установлена скромных размеров, но достаточно тяжелая металлическая ступа — настоящий гаситель колебаний. От этого дополнительного веса период колебаний всей конструкции возрастает и при землетрясении картина ее колебаний будет примерно такой. Задвигается вместе с грунтом каменная платформа основания со стоящими на ней жесткими стенами первого этажа, у них будет самая большая амплитуда колебаний, а вот вверх от

этажа к этажу эти колебания будут постепенно затухать и самая верхняя масса в силу своей инертности будет стоять на месте. Через каких-нибудь тысячу лет подобные виброгасители мы будем применять в телевизионных башнях. Разумеется, только дьявол может предложить такое замечательное устройство для гашения колебаний, кто же еще до этого додумается? Это же просто нелогично. Чтобы сделать сооружение более надежным, необходимо по шатким конструкциям из дерева затащить на высоту 66 м кирпичи и здоровенную металлическую болванку, утяжелить этим все сооружение вопреки принципам сейсмостойкости, а в результате все-таки получить сооружение повышенной сейсмостойкости.

Давайте на этом остановимся, думаю, более фантастического примера деревянного сооружения, несущего какую-нибудь интересную идею сейсмостойкости, мы больше не разыщем. Широкие возможности дерева по созданию сейсмостойких конструкций, по-видимому, ясны.

## О ЧЕМ НУЖНО ЕЩЕ РАССКАЗАТЬ

Очень много достаточно интересных для нашей тематики фактов осталось за рамками данной книги, поэтому я считаю нужным привести несколько разрозненных примеров древних сейсмостойких конструкций, чтобы дополнить уже сказанное.

Цилиндрический свод — древнейший конструктивный элемент, широко применявшийся для перекрытия самых различных сооружений — от дворцов и храмов до водосточных канав. В Месопотамии, начиная с древних Шумер и до раннесредневекового Ирана, издавна применялись цилиндрические своды из обожженного кирпича для перекрытия продолговатых прямоугольных залов монументальных зданий. Рассмотрим самый уникальный пример такого здания, перекрытого цилиндрическими сводами. Зодчий древности, несомненно имевший глубочайшие познания в строительном деле и невообразимую решительность, оставил нам в наследство дворец царя Хосрова I в Ктесифоне, который считается наивысшим достижением сводчатых конструкций сасанидского периода Ирана (рис. 80). Самыми интересными в конструкции этого дворца являются два кирпичных свода, перекрывающие центральную часть. Эти своды имеют пролет почти в 27 м, высоту 30 м, длину 45 м. Первый свод, показанный на рис. 80, открыт с фасадной стороны и перекрывает приемный царский зал. У заднего торца этого свода имеется соединенная с ним вертикальная кирпичная стена. У второго внутреннего свода стены имеются с обеих сторон.

Размеры этих гигантских кирпичных сводов, построенных в VI в., будут превзойдены, и именно самими иранцами, только в XIV в. Удивительно, как зодчий взялся, а царь позволил возводить такие своды. Опыта строительства сводов таких фантастических размеров тогда еще не было. Самый большой купол из кирпича на известковом растворе, возводить который в общем-то проще, чем свод, был построен к этому времени в Чор-Капу. Его диаметр был 16,15 м. Любопытно, что для экономии

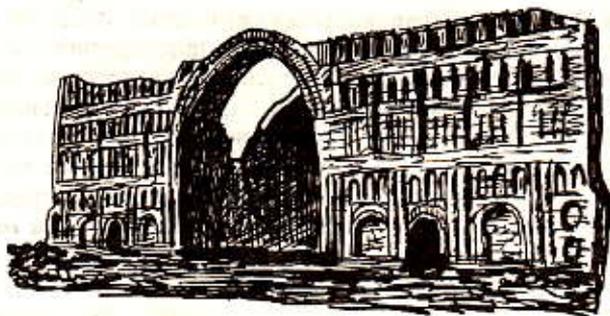


Рис. 80. Тронный зал царя Хосрова I

кирпича стены этого сооружения были возведены из необработанного камня, что снижало сейсмостойкость всего сооружения. Для нас конструкция сводов над залами дворца царя Хосрова I интересна не только своими размерами, но и строительными приемами, которые позволили части одного из сводов сохраниться в целости до нашего времени. Попробуем разобраться в этих приемах.

Перекрытый гигантским кирпичным сводом, открытый с передней стороны царский приемный зал является архитектурным центром всего дворца. Второй зал, перекрытый точно таким же сводом и расположенный сзади первого по той же оси, что и первый зал, был закрыт стенами с обоих торцов. Оба свода конструктивно не были связаны между собой, что, разумеется, совершенно правильно с точки зрения сейсмостойкости самих сводов и всего сооружения. Главная проблема всего сооружения, и это прекрасно понимали зодчие древности, воспринять распоры от двух тяжелых кирпичных сводов. Больше того, такие своды делались впервые, и поэтому необходимо было дать солидные запасы прочности. Это и было осуществлено. Толщина стены в месте плавного перехода от свода к стене была 4 м, а в самом низу у фундамента 7 м. Этих массивных трапециевидной устойчивой формы стен для восприятия распора от сводов для древних строителей показалось еще мало. Тогда в крыльях здания были устроены помещения, перекрытые сводами и куполами, упиравшиеся своими стенами в стены центральных сводов и осуществлявшие дополнительную поддержку этим стенам. Как показала история, эти дополнительные мероприятия были уже не нужны. Крылья дворца, кроме фасадной парадной стены, давно разрушились, а первый центральный свод, поддерживаемый только своими стенами, продолжает стоять до сих пор. Строитель древности не зря так тщательно готовился к восприятию стенами распора от кирпичного свода, который имел пролет 27 м, толщину в замке 1 м, а у пят свода — 1,8 м. Такой свод имеет, конечно, чудовищный вес и распор от него соответствующий. Вообще интересно, как 1,5 тыс. лет тому назад определяли распор от сводов и куполов. А в том, что умели это делать, сомневаться не приходится.

Я умышленно пока нигде не говорил об очертании рассматриваемых

нами сводов. Так вот, изучаемые нами гигантские своды не являются, как это было с более древними, круговыми цилиндрическими, а имеют более возвышенное очертание, конфигурацию которого можно описать из трех центров, в противоположность круговому цилиндрическому, описываемому из одного центра. Возвышение свода или купола, как мы уже знаем с точки зрения сейсмостойкости очень важное мероприятие, так как в этом случае снижается распор от них и соответственно можно облегчить несущие стены и всю конструкцию. Несмотря на массивность рассматриваемого нами дворца, видны попытки его строителя облегчить это сооружение. Кессонов, которые удобно выполнять в технике литого римского бетона, здесь нет, нет и тонкой кирпичной оболочки на кирпичных же ребрах жесткости, так как еще нет той виртуозной кирпичной кладки, которую мы видели в Средней Азии. Вместо всего этого для облегчения сооружения были выложены своды переменной толщины. Вверху, в замковой части, они были тоньше и постепенно утолщались вниз, к месту опирания на стены. Сразу получилось и облегчение конструкции, и равномерное загрузление материала в ней. Решались те же проблемы, с которыми мы мучаемся и по сей день.

Еще одна интересная деталь в рассматриваемом нами примере. Первый свод над царским приемным залом стоит до сих пор, а заднего свода давно нет. В чем тут дело? Оба свода были одинаковых размеров и формы, одного качества и из одного материала. Ответ на эту загадку надо искать в некотором различии конструкции сводов. Об этом отличии я уже вскользь упоминал. Сохранившийся первый свод был более гибким, так как передней стены у него нет, а задняя отслоилась. Такой большепролетный свод, не ужесточенный ребрами и стенами, достаточно гибок, чтобы без разрушений воспринять возникающие при землетрясении неодинаковые подвижки массивных стен. Задний же свод был ужесточен массивными стенами по обоим торцам. Все согласно нашим принципам сейсмостойкости: при землетрясении эластичные конструкции ведут себя лучше, чем жесткие. А в целом сооружения той эпохи отличались жесткостью куполов, сводов и стен, последние вдобавок имели неоднородные прочностные свойства [44].

В ночь на 21 июня 1990 г. в Иране произошло сильнейшее землетрясение, при котором погибло несколько десятков тысяч человек. Интересно, устояли ли тронный зал Хосрова I и мавзолей Ольджейту в Султанье, о которых мы с Вами говорили. Скорее всего устояли, но получили новые рубцы. Исследует ли их кто с точки зрения сейсмостойкости и палеосейсмологии? А это важно именно для современного строительства.

Таинственные скифы с их степными надмогильными курганами, непреклонным характером и золотыми изделиями в "зверином стиле". Представлять их только лихими конниками будет совершенно неверно, у них была своя государственность, свои города и свои умелые ремесленники и строители, которые разбирались в антисейсмических приемах. Недалеко от современного Симферополя существовал город Неаполь Скифский, при раскопках которого в 1946 г. был обнаружен каменный мавзолей, принадлежавший, видимо, знаменитому скифскому царю

Скилуру, жившему во II в. до н.э. Повторять о сейсмической активности Крымского полуострова не буду, это знали скифы и учитывали в своих постройках, которые стали возводить с переходом к оседлому образу жизни. Вместо юрт они начали строить дома, а вместо степных курганов над могилами своих военачальников возводили городские мавзолеи. Вот перечень антисейсмических мероприятий, примененных в стенах рассматриваемого нами мавзолея: камни уложены с перевязкой, один или два камня укладывались вдоль, следующий устанавливался на ребро поперек, применялись толстые слои глиняного раствора, который придает жесткой каменной кладке упругопластические свойства; для надежной перевязки продольных и поперечных стен в углах здания заложены Г-образные камни (таких мы еще нигде не встречали); стены шириной до 1 м стоят на фундаменте из рваного камня небольшой глубины (до 0,4 м), но фундамент не доводился до скалы, а стоит на тщательно выровненном зольном слое. В мавзолее широко применяется дерево, главным образом в конструкции плоского перекрытия и при армировании верхней части стен, выполненных из сырцового кирпича [45].

Теперь отправимся в Китай. Хочется обратить Ваше внимание на самую сейсмостойкую в мире конструкцию, которая может успешно конкурировать не только с модернизированной русской изобой, но и со зданием, оторванным от земли с помощью воздушного шара. Это подвесные мосты, получившие распространение в горных районах. Основу их представляли канаты или железные цепи, по которым укладывались поперечные брусья, а на них уже приклеплялись доски настила. Из таких же цепей или канатов устраивались перила, соединенные между собой и с горизонтальным настилом вертикальными стойками. На берегах закладывались надежные опоры, некоторые из них снабжались специальными устройствами, позволявшими регулировать натяжение канатов. Длина висячих мостов достигала 150 м, ширина 3 м. Такие мосты начали строить в XVI в., из них наиболее долговечными оказались мосты на железных цепях. В 1701 г. в провинции Сычуань через р. Дадухэ построен мост Лудитесоцяо. Его длина равна 100 м, ширина — 3 м. На девяти цепях диаметром 9 см каждая уложен деревянный настил, который сверху придерживают два каната. Перила также выполнены из железных цепей. Думаю всем понятно, что даже основательные друг на друга не похожие движения опорных береговых конструкций во время землетрясения не смогут разрушить такую подвесную конструкцию. А вот висячие "Сады Семирамиды" — одно из чудес света в нашем смысле вовсе не являются висячими. Это был просто-напросто дворцовый сад, поднятый на системе кирпичных конструкций на огороженную крышу здания, принадлежал он царице Вавилона Шаммурагат (рис. 81). Все богатые люди тех жарких мест старались занять такой садик.

В равнинной местности Китая применялся другой тип мостов — арочные многопролетные. Использовались арки разнообразных форм, от полукруглых до эллиптических и стрельчатых. Особое внимание обращалось на прочность моста, для обеспечения прочного соединения между каменными блоками они укладывались на известковый раствор, в который для улучшения сцепления добавлялась бычья кровь и клейкий

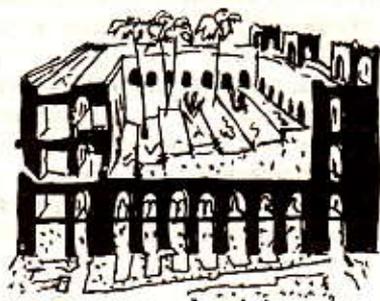


Рис. 81. Не висячие, а стоячие "Сады Семирамиды"

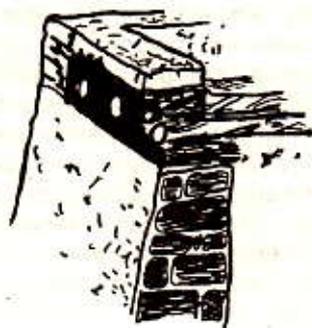


Рис. 82. Конструкция сейсмостойкого жилища Тибета

рис. Особенностью этих мостов является то, что возводились они в сейсмоопасных районах, часто в низменной местности, следовательно, на плохих грунтах. Все это прекрасно осознавали древние зодчие и как могли стремились сохранить свои сооружения. В данном случае кроме прочной кладки устраивалось свайное основание, а для повышения надежности конструкции пролеты мостов как бы составлялись из набора арок, каждая из которых могла работать независимо, и если часть арок разрушалась, то оставшиеся могли нести нагрузку от моста. Одиннадцатипролетный мост Лугоуцяо через Юндинхэ расположен в 15 км от Пекина. Его длина составляет 235 м, ширина — 8 м, его украшают 437 скульптурных изображений. Он весь возведен из плит известняка. Этот мост уже существовал в VI–VII вв., в XIII в. через него проехал Марко Поло. Это один из известнейших и долговечнейших мостов Китая.

Из разнообразных чудес Китая хотелось бы еще назвать строившиеся там железные и бронзовые пагоды. Материал, из которого возводятся сооружения, играет большую роль в обеспечении сейсмостойкости конструкций. Бронза и железо для того времени были, наверное, лучшими материалами с точки зрения сейсмостойкости. В 1061 г. в провинции Хубей была возведена железная 13-ярусная пагода, сложенная из чугуновых литых плит высотой 21 м. В этой пагоде обращает на себя внимание чрезвычайная стройность, отношение высоты к диаметру в основании равно 10, а пагода продолжает стоять, ей не страшны ни ветер, ни сейсмические воздействия. Это говорит только о том, что между чугуновыми плитами хорошо организованы связи.

Еще более загадочна конструкции корейской пагоды в монастыре Вонгакса (1464 г.). Сечение этой пагоды меняется с высотой не постепенно, как это делается обычно, а ступенями. Нижние три яруса почти такие же, как постамент, имеющий форму 12-угольной звезды, а семь верхних ярусов имеют прямоугольное сечение значительно меньшего размера. Получилась конструкция из двух секций, одна из них нижняя жесткая, другая верхняя гибкая. Но самое здесь загадочное в том, что вся пагода выполнена из белого мрамора, хрупкого материала [22].

Любопытны народные традиции Тибета, являющиеся зоной высокой сейсмичности. Там строились дома из камня кубовидной формы. Стены для устойчивости имели расширение книзу и в их толщину закладывались деревянные стоечно-балочные каркасы. Интересно то, как опирались балки крыши на стены (рис. 82). Здесь было применено упругое амортизирующее устройство из корней самшита. Одновременно эта толстая прослойка из корней служила вентиляцией.

Теперь отправимся в Индию, которую мы как-то обошли вниманием, хотя здесь есть, что посмотреть. Есть тут храмы с плоскими и высоко вздернутыми ложными тяжелыми куполами, есть подземные храмы, здесь же мавзолей Тадж-Махал, купольные мечети и все это в условиях высокой сейсмичности. Но из всего этого разнообразия выберем только один пример, говорящий о стремлении индийских зодчих придать кладке стен свойства однородности и монолитности, как это требуется по условиям сейсмостойкости. Они этого добились и очень просто: вырубили храм Кайласа в Эллоре целиком из скалы. Его размеры 50×33, 2×32,61 м. В мире больше нет такого грандиозного архитектурного памятника, целиком вырубленного из скалы подобно статуе. Обсуждать такие важные свойства сейсмостойких конструкций, как однородность кладки, перемычка швов и величина сцепления раствора, здесь не приходится, все это решилось само собой [22].

Кстати, идея обеспечения монолитности конструкции путем использования огромных деталей сооружений была не чужда и европейцам. Известен монолитный многотонный купол на гробнице Теодориха в Равенне. Купол был целиком вырублен в Истрии и доставлен на буксире между двумя кораблями до отмели, откуда и был уже подтянут к близкому месту установки [46]. Гробница Теодориха похожа на гробницу Елены, о которой уже говорилось.

Теперь осталось нам побывать в Америке до ее завоевания испанцами в 1519 г. Здесь хотелось бы сказать, что в Новом Свете мы увидим другие оригинальные конструкции, совершенно не похожие на те, с которыми мы встречались ранее. С одной стороны, свою роль сыграло разделяющее два мира пространство океанов, а с другой — в человеческой логике есть кое-что общее. Поэтому в строительных приемах тольтеков и инков, египтян и греков мы видим много подобного. Давайте рассмотрим несколько примеров.

Недалеко от Мехико в долине, которую часто сотрясают сильнейшие сейсмические толчки, расположена одна из древнейших пирамид Куикуилько, возведенная до 500 г. до н.э. Это круглое в плане, четырехступенчатое, довольно распластанное сооружение диаметром в основании 135 м, высотой всего около 20 м. Пирамида сложена из крупных валунов, втопленных в глину. Вот Вам еще пример сейсмостойкой конструкции. Довольно плоский рыхлый массив тела пирамиды будет дышать вместе с поверхностью земли, не разрушаясь во время землетрясения. Эта многоступенчатая круглая пирамида из камня и глины обладает, по-видимому, такой же сейсмостойкостью, как и прямоугольные ступенчатые зиккураты Вавилона из необожженного кирпича. Кстати, они и относятся к одному времени.

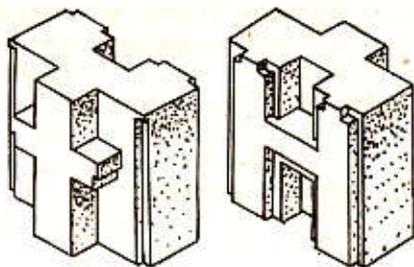


Рис. 83. Блоки древнего храмостроения

Самая большая в мире пирамида была возведена тольтеками в Чолуле, она имеет в основании размер  $300 \times 320$  м. Внутри ее находятся еще три пирамиды. Каждая последующая пирамида получалась как надстройка над предыдущей, которая засыпалась землей, камнями, глиной и облицовывалась камнем. В результате получалось, что огромный массив-гора был армирован несколькими слоями каменной кладки. Названная гигантская пирамида в Чолуле служила платформой под святилище Кецалькоатля. Вообще платформы под пирамиды, храмы и даже обычные дома были весьма распространены у народов, населявших Новый Свет. Эти платформы насыпались из земли и глины, а потом облицовывались камнем, поэтому по механическим свойствам их можно назвать мягкими в противоположность, например, платформе из крупных каменных блоков, которая была построена под дворцовыми сооружениями Персеполя, являвшегося столицей Ирана ахеменидского периода. Эта платформа была уже жесткой. Соответственно и работа их в условиях сейсмического воздействия будет разной: мягкая платформа служит сейсмоизолятором подобно глиняным подушкам Средней Азии, а жесткая платформа осредняет, интегрирует сейсмическую волну, срезает ее пики. А в конечном итоге обе платформы являются антисейсмическим мероприятием.

В конструкциях народа майя применялся известковый раствор, поэтому ядра стен, пирамид и платформ уже состояли из щебня и земли, залитых известковым раствором. Это позволяло строить более высокие пирамиды, скорее похожие на башни. Один из храмов майя в городе Тикаль имел высоту 70 м. Это уже были жесткие конструкции. Клиночатые своды там не были изобретены, но зато широко применялись ложные своды, образуемые надвигом камней с высокой стрелой подъема, буквально как в Царском кургане, о котором мы уже говорили. Больше того, там применялись точно такие же затяжки из камня и дерева. Колоннады, входившие в прихрамовые комплексы, состояли из колонн, собранных из отдельных цилиндрических барабанов и соединенных одним центральным деревянным штырем, подобно тому как было в греческих храмах.

Несколько слов о еще более развитой цивилизации по сравнению с цивилизацией Центральной Америки, которая была расположена в Южной Америке в Андах. Только один пример. В III в. на берегу оз. Титика-

ка был основан город Тиахуанаку на высоте 3825 м над уровнем моря. Этот город состоял из трех групп зданий, каждая из которых была возведена на гигантской земляной платформе, облицованной хорошо обработанным камнем. Одна из этих платформ имеет размер 210×210×15 м. В развалинах третьей группы зданий, названной Пума-Пунку — двойная пирамида, сохранились гигантские блоки каких-то сооружений (рис. 83). Эти блоки достигают веса 200 т. Но самое удивительное, что блоки, отесанные с помощью только бронзовых орудий, отличаются сложной конфигурацией и точной геометрией. При монтаже они точно входят один в другой и имеют соответствующие углубления, которые позволяют соединять их друг с другом каменными шипами и Т-образными бронзовыми скобами. Правда, все эти связи не заливаются свинцом, как у греков, но зато блоки намного больше, они входят один в другой и зацепляются один за другой. Конструкции из этих блоков по своей тяжести напоминают египетские сооружения.

На этом давайте закончим наше путешествие по древним сооружениям.

Для полноты книги осталось немного поговорить о современном сейсмостойком строительстве. Подробно об этом в популярной форме рассказано в работе [47].

## СОВРЕМЕННОЕ СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

На примерах древних архитектурных памятников мы с Вами разобрали основные принципы сейсмостойкого строительства и их конструктивное воплощение. В наш бурный век новыми в сейсмостойком строительстве являются строительные материалы и большие технические возможности, а идеи для разработки систем сейсмозащиты принципиально нового практически не имеют. Все уже в какой-то конструктивной форме применялось. Новыми, может быть, являются только здания-роботы, которые оборудованы специальными устройствами, меняющими их параметры с целью максимального снижения сейсмической нагрузки, в зависимости от параметров подходящей к нему сейсмической волны.

В начале книги уже говорилось о трех способах сейсмозащиты зданий. Первые два способа сейсмозащиты в настоящее время самые ходовые, они будут применяться еще очень долго, а вот третий — способ отдаленного будущего, хотя уже сейчас есть его конструктивные воплощения и они будут приведены ниже. Во что конструктивно выльется третий способ, сейчас трудно даже вообразить. Система активной сейсмозащиты состоит из трех блоков. Первый — это приборы, фиксирующие землетрясение и передающие сигнал на второй блок, который состоит из программного устройства. В задачу второго блока входит принятие решения. Если землетрясение не представляет опасности для защищаемого объекта, то система не срабатывает. В противоположном случае подается команда на третий блок и в зависимости от параметров подходящей сейсмической волны выполняется соответствующая корректировка пара-

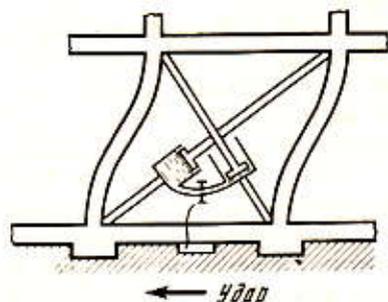


Рис. 84. Здание-робот

метров сооружения. Например, в качестве третьего блока силовой установки можно использовать электромагниты. В этом случае при приближении сейсмической волны с максимальной амплитудой в 2,5 см достаточно, чтобы магниты заработали и приподняли здание над поверхностью земли на 3 см, чтобы пропустить под ним эту сейсмическую

волну. В качестве такой силовой установки можно будет использовать струи воздуха, воды. Когда-нибудь изобретут экраны против поля гравитации, тогда достаточно будет под зданием включить такой экран и оно торжественно всплывет над всеми подземными стихиями.

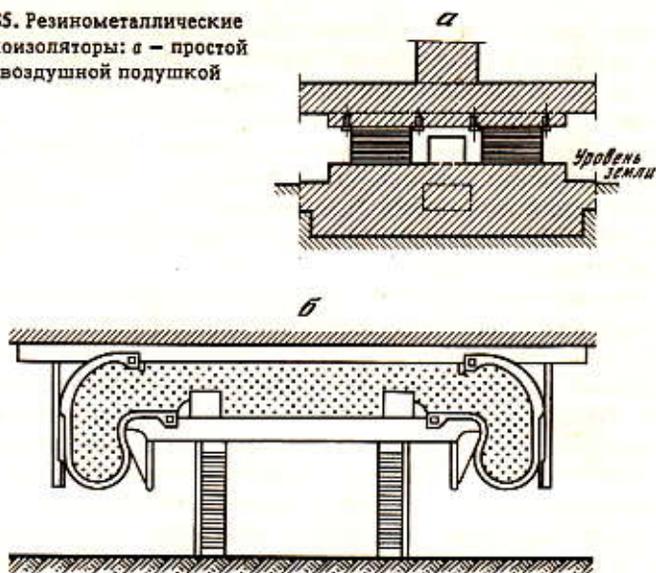
Но для активной сейсмозащиты не обязательно, чтобы здание всплывало над своим фундаментом, тем более что это дело далекого будущего. В настоящее время гораздо проще в зависимости от параметров подходящей сейсмической волны менять жесткостные характеристики здания и соответственно его динамические параметры так, чтобы в нем не возникли колебательные процессы, близкие к резонансным.

На рис. 84 показано схематически устройство, примененное в Японии, расположенное на первом этаже здания и позволяющее проводить автоматически отстройку от резонансного режима [47]. Имеются диагональные связи, в каждую из которых введены поршневые элементы. Цилиндры поршней соединены между собой трубкой, по которой в зависимости от нагружения диагональных стержней перетекает жидкость. При изменении скорости протекания жидкости меняется и жесткость диагональных связей, необходимо зарегулировать эту скорость, для чего на трубке стоит задвижка, управляемая программирующим устройством, меняющим жесткость конструкции здания так, чтобы в нем не было резонансных явлений.

Существуют еще более простые конструкции систем активной сейсмозащиты — это здания, в которые вводятся специальные выключающиеся и включающиеся связи. Предусматривается, что в случае резонансных явлений эти связи должны разрушиться или, наоборот, включиться, что приведет к перемене жесткости всего здания и выходу его из резонанса [47]. Нужно надеяться, что эти системы будут применяться в будущем. В настоящее же время разрабатываются многочисленные конструктивные решения и широко внедряются системы пассивной сейсмозащиты, в задачу которых входит уменьшение связи между зданием и грунтом. Условно их можно разделить на две категории, в одной используется трение скольжения, в другой — трение качения.

Самыми простыми и распространенными во всем мире являются многослойные сейсмоизоляторы. Они состоят из металлических пластинок, между которыми находятся резиновые прокладки (рис. 85, а). За

Рис. 85. Резинометаллические сейсмоизоляторы: а — простой  
 б — с воздушной подушкой



счет упругой податливости этих резинометаллических сейсмоизоляторов фундамент может смещаться с грунтом во время землетрясения, а здание будет испытывать колебания в уменьшенном, смягченном виде. В этой конструкции можно учесть то, что вышеназванный сейсмоизолятор плохо защищает здание от вертикальной составляющей сейсмического воздействия. Для улучшения его работы к нему добавляется воздушная подушка высокого давления, которая и смягчает вертикальный удар (рис. 85, б).

Другие сейсмоизоляторы используют трение скольжения, это так называемые скользящие пояса. Они выполняются в виде ряда опор, расположенных между фундаментом и верхней частью здания. Каждая опора состоит из двух металлических или пластмассовых пластинок, не связанных между собой. Нижняя пластинка прикреплена к фундаменту, а верхняя к нижней части здания. При достаточно сильном и, следовательно, опасном землетрясении, сейсмические силы превзойдут силы трения, существующие между пластинками, и здание будет спасено проскальзыванием относительнодвигающегося фундамента. Отсюда ясно, что большего усилия на здание, чем сила трения, не может быть передано. По этой причине в сейсмоизоляторах этого типа для снижения сейсмической нагрузки стремятся снизить коэффициент трения. Например, в Японии металлические пластины смазывают маслом, что снижает сейсмическую нагрузку в 10 раз. В Китае есть конструкции малоэтажных кирпичных "зданий, построенных на песке". В этих зданиях между нижними балками и фундаментом насыпан специальный песок, который обеспечивает их взаимное проскальзывание. Считается, что так обеспечивается сейсмостойкость даже зданий низкого качества. Во всех этих конструкциях

необходимо предусмотреть упругие ограничители, чтобы здание не соскользнуло с опор. Если совсем избавиться от сил трения между зданием и фундаментом, то сейсмическая сила в здании не возникнет. В общем-то это технически осуществимо при современных легких строительных материалах. Если построить здание плавающим в бассейне с гибкими стенками, куда может быть налита не только вода, а любая другая тяжелая жидкость для повышения архимедовой силы, то получим универсальный сейсмоизолятор, предохраняющий здание от всех составляющих сейсмического воздействия.

С целью снижения трения устраивают сейсмоизоляторы, в которых трение скольжения заменено трением качения. Все они состоят из комбинаций шаровых поверхностей и, как правило, устроены так, что после землетрясения силой собственного веса сооружения возвращаются в исходное положение. Применение их более эффективно, но и изготовление значительно более сложно и дорого. Самой, по-видимому, простой конструкцией будут шары, часто чугунные, вложенные между сферическими поверхностями (рис. 86). Вместо шаров могут применяться и более сложные тела вращения, например эллипсоиды. Как работают такие системы, ясно из рис. 86. Для упрощения изготовления таких сейсмоизоляторов устраивают просто катковые опоры, как было сделано в Канаде, а в исходное положение их возвращают упругие пружины (рис. 87).

Существует еще маятниковый (назовем так) способ сейсмоизоляции. Один из вариантов такой конструкции показан на рис. 88. В фундаменте устроен колодец, в котором на четырех тязжах подвешена плита. На плиту опирается железобетонная колонна здания. В результате все здание получается подвешенным. Для увеличения затухания такой маятниковой конструкции на дно колодца можно насыпать песок. В случае такой подвески здание будет иметь значительно больший период собственных колебаний, чем без подвески. В результате основание опять будет колебаться во время землетрясения, а верхняя часть, т.е. здание, в силу своей инертности будет стоять на месте. Существует много вариантов такой конструкции.

Хорошо зарекомендовали себя многоэтажные подвесные здания при землетрясении 1957 г. в Мехико. Эти каркасные здания стояли на монолитных железобетонных плитах, которые были подвешены к оголовкам металлических свай, пропущенных через отверстия в этих плитах.

Необходимо отметить, что практически ни один из перечисленных элементов сейсмозащиты в чистом виде не применяется. Большой эффект дает комбинация элементов. На рис. 89 показана такая комбинированная система, примененная в США. В ней и катковая опора в виде двухрядного набора шаров, и анкерные болты, которые должны срезаться при превышении сейсмической нагрузки определенного уровня, когда требуется включить катковую систему сейсмозащиты. Здесь и неопределенный элемент, являющийся гасителем колебаний.

Чрезвычайно важно разрабатывать системы сейсмозащиты к особо ответственным сооружениям: мостам, блокам атомных станций, сооружениям с вредным производством. Конечно, названные системы сейсмоза-

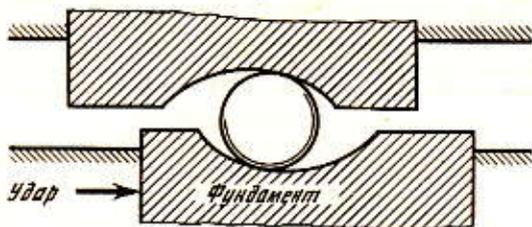
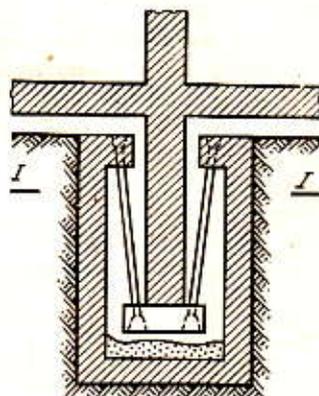


Рис. 86



По I-I

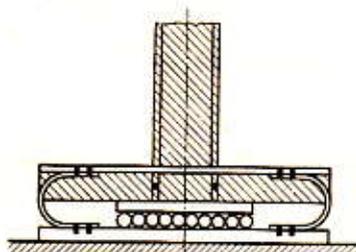


Рис. 87

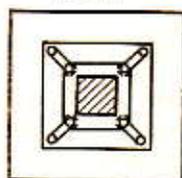


Рис. 88

Рис. 86. Гравитационная система сейсмозащиты

Рис. 87. Комбинированный сейсмоизолятор

Рис. 88. Маятниковая система сейсмоизоляции

щиты не исчерпывают всего многообразия того, что уже изобретено и что еще будет придумано. На примерах был только показан их принцип действия.

Вот интересный пример протяженного здания с подвесным перекрытием. Это выставочный зал в г. Китакусю в Японии. Покрытие зала подвешено на 16 стальных мачтах, размещенных снаружи здания вдоль продольных стен по восемь с каждой стороны. Весь зал размером  $173 \times 43$  м состоит из восьми секций размером  $21,6 \times 42,7$  м. Каждая секция подвешена на двух мачтах (рис. 90). Опирание мачт выполнено шарнирно через упругие прокладки. На расстоянии 25 м от здания имеются свайные блоки, к которым и прианкерены мачты. К местам пересечения балок перекрытия подходят ваны от мачт. Настил покрытия собран из легких железобетонных элементов. Комментировать сейсмостойкость такой конструкции считаю излишним, читатель уже сам должен разобраться.

На рис. 91 показано 52-этажное здание в Токио высотой 212 м с четырьмя подземными этажами. Несущая конструкция здания представляет собой соединение в единое целое трех стальных пространственных рам. Фундамент выполнен из жесткой железобетонной плиты, далее идут два подземных этажа из обычного железобетона. Заглубление фундамента

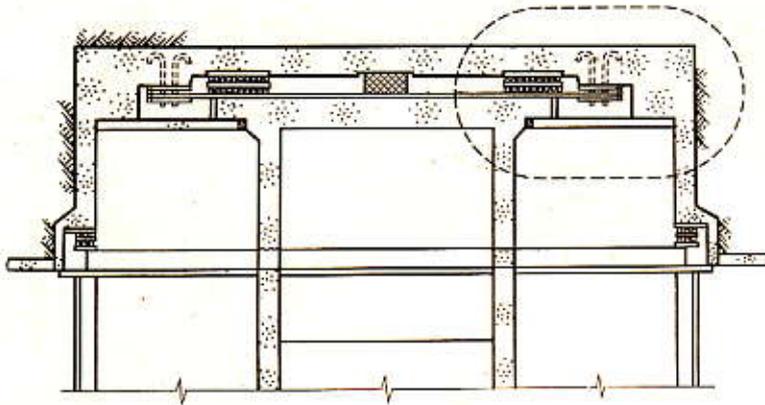


Рис. 89. Комбинированный сейсмоизолятор

составляет более 20 м. Получился настоящий сухопутный корабль, приспособленный для плавания в сейсмических волнах. Кстати, как обычный морской корабль с большой осадкой меньше раскачивается на волне, так и сооружение с глубоким фундаментом или свайным основанием меньше раскачивается на сейсмической волне, чем сооружение с мелким заложением фундамента, опирающееся на поверхностные слои земли, где сильнее себя проявляют поверхностные волны. Перед Вами здание, в котором воплощены все принципы сейсмостойкого строительства, не говоря уже о замкнутых контурах и гибкости всей конструкции даже с точки зрения размеров (отношение высоты к размерам фундаментной плиты 2:1). Расчетная схема всего здания чрезвычайно проста и сейсмостойка, она точно такая же, как у среднеазиатского минарета Калян. Это жесткая сильно заглубленная плита фундамента, к которой прикреплена умеренно гибкая надземная часть сооружения. У древних строителей она выполнена в кирпиче, у современных — в металле. Что лучше? Надо еще посмотреть. Металл прочнее, но кирпич долговечнее. Современное металлическое здание навряд ли простоит 800 лет. Любопытно, что древние и современные строители пришли к одной и той же схеме строительства высотных сооружений.

В заключение весьма краткого обзора современных сейсмостойких конструкций рассмотрим еще один их тип. Это сооружения, которые обладают 100%-ной гарантией их сейсмостойкости, хотя для жилого строительства их пока трудно применить. Принцип снижения веса сооружения в них доведен практически до абсолюта. Это разнообразнейшие пневматические конструкции. В США ведутся разработки большепролетных сейсмостойких пневматических покрытий для стадионов, театров, концертных залов. При этом может быть разработан в пневматическом исполнении весь комплекс сооружения, например бассейна. В этот комплекс войдут перекрытия, надувные трибуны, сам бассейн. Размеры сооружения могут меняться в зависимости от требуемой вместимости. Ясно,

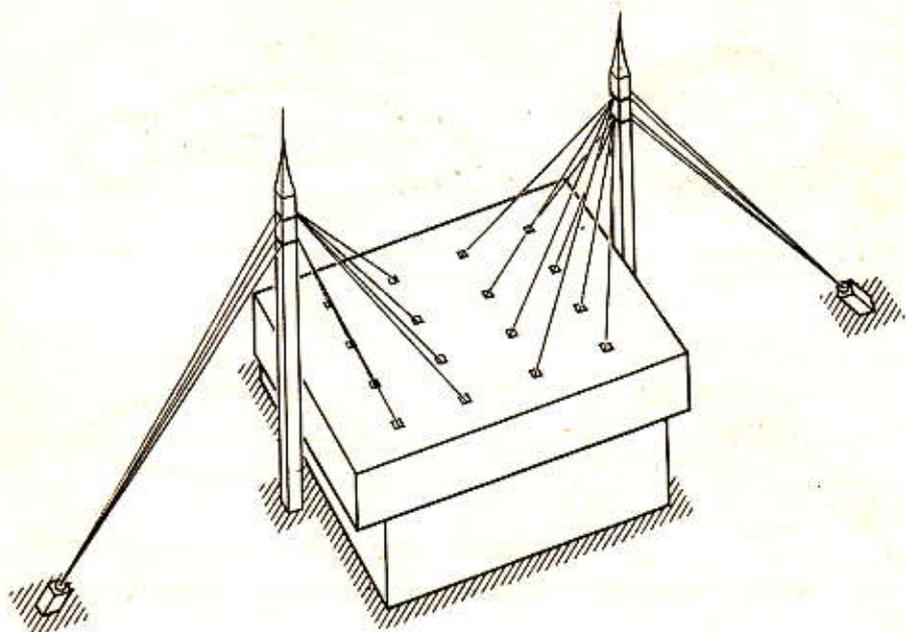


Рис. 90. Здание с подвесным перекрытием

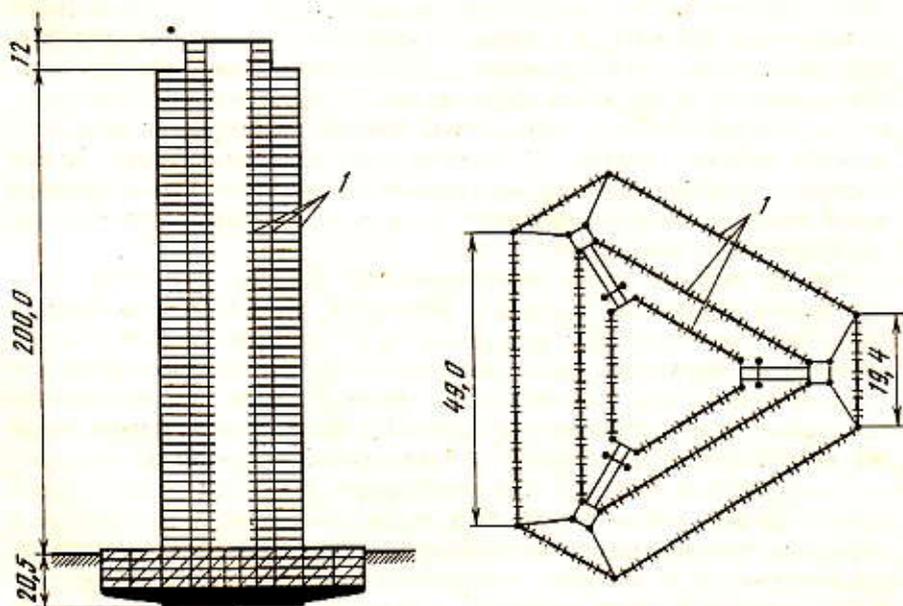


Рис. 91. Современное высотное сейсмостойкое здание

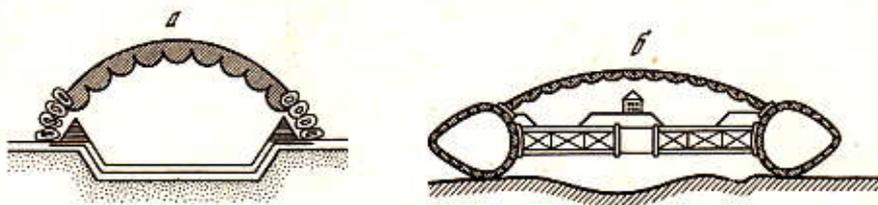


Рис. 92. Пневматические конструкции: а — с изменяемыми размерами; б — сверхгигантская платформа

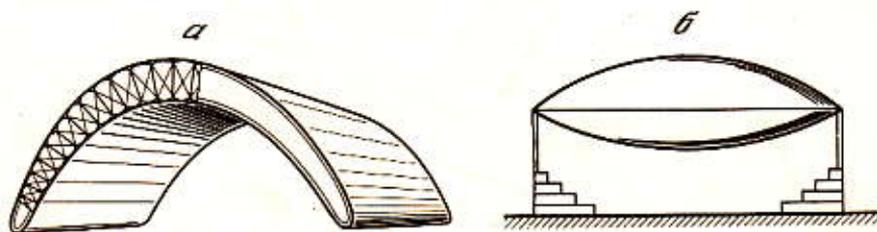


Рис. 93. Пневматические перекрытия: а — переносное; б — стационарное

что ограничений на размеры этих сооружений с точки зрения сейсмоки никаких нет (рис. 92, а).

Существует также разработка фантастической гелиенаполняемой конструкции, похожей на корабль инопланетян, с внутренней платформой, на которой можно разместить оборудование, здания, научные станции диаметром до 500 м. Как видно из рис. 92, б, такое сооружение состоит из пневмокаркасного перекрытия, рабочей платформы и пневматического опорного кольца. С помощью вертолета конструкцию можно доставить в любое место и установить на любой грунт. Землетрясения такой конструкции с опорным упругим кольцом, разумеется, не страшны, она будет от них изолирована.

Вообще пневмоконструкции позволяют довести некоторые идеи купольных перекрытий до идеала. Вспомните, что в соборе св. Петра в Риме была конструктивно воплощена идея двойного купола с целью расположить материал в тех местах, где он работает, и избавиться от ненужных лишних масс в центральной, нерабочей зоне. Для обеспечения совместной работы оболочек они были соединены ребрами. В наше время эта идея доведена до абсолюта в пневматических двойных мембранных сооружениях. На рис. 93, а изображена такая оболочка, которой можно придать любую форму. Она изготавливается из двух мембран с воздухонепроницаемым покрытием, нужное расстояние между которыми поддерживается с помощью совместного действия стяжек и внутреннего давления. Такие пневматические конструкции применяются в тех случаях, когда желательно иметь небольшие упаковочные размеры при транспортировке и простой монтаж на месте назначения. Конструкция на

рис. 93,а была использована как покрытие павильона на выставке в Цукуба, в Японии.

На рис. 93,б показан тип стационарных пневматических куполов, которые усиливались стальными тросами. Такие воздушные купола могут перекрывать пролеты до 200 м, имея вес 10 кг на 1 м<sup>2</sup> перекрываемой площади. Сравните с куполом Пантеона, у которого на 1 м<sup>2</sup> приходится 7,3 т камня. Воздушным куполам страшны тайфуны и снеговые нагрузки, а вот сеймики они не боятся по вполне теперь понятным нам с Вами причинам. Легкие купола могут изготавливаться из легких металлов, из стеклопластиков и тому подобное [47].

Итак, в наш век сейсмостойкое строительство имеет большие возможности выбора нужных строительных материалов и строительной техники. Дело за нашей аккуратностью, образованностью, гуманностью и желанием строить так, чтобы никакие стихийные бедствия были нам не страшны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Думаю, что предложенная в данной книге позиция взглянуть на древние сооружения с точки зрения современного представления о сейсмостойких конструкциях себя оправдала. Многообразие древних построек использовалось для иллюстрации различных подходов к созданию сейсмостойких сооружений. На примерах из древности легко было показать, что антисейсмическая защита — понятие весьма широкое. Это не просто увеличение марки бетона и количества арматуры, как многие, даже специалисты, полагают сегодня, а целая система мер, направленных на обеспечение сохранности зданий во время землетрясений и на увеличение его долговечности. Этому собственно и посвящена книга, в которой я старался создать положительный образ древнего строителя как образец для подражания современному строителю и показать, что у древних есть чему поучиться.

Насколько мне это удалось, судить Вам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Оразымбетов Н.Р., Сердюков М.М., Шанин С.А.* Ашхабадское землетрясение 1948 г. М.: Госстройиздат, 1960. 308 с.
2. *Усейнов М., Бреганицкий Л., Саламзаде А.* История архитектуры Азербайджана. М.: Стройиздат, 1963. 396 с.
3. *Ахундов Д.А.* Архитектура древнего и раннесредневекового Азербайджана. Баку: Азерб. изд-во, 1966. 310 с.
4. *Брунов Н.И.* Очерки по истории архитектуры. М.; Л.: Академия, 1937. Т. 1. 442 с.
5. История древнего Востока. М.: Высш. шк., 1988. 416 с.
6. Всеобщая история архитектуры. М.: Стройиздат, 1970. Т.1. 512 с.
7. *Сансоне В.* Камни, которые надо спасти. М.: Мысль, 1986. 236 с.
8. *Башкиров А.С.* Антисейсмизм древней архитектуры. Т.2. Греция. М.: Московский городской пед. ин-тут. Учен. зап., 1949. 337 с.
9. *Резанов И.А.* Атлантида: Фантазия или реальность? М.: Наука, 1976. 134 с.
10. *Кинк Х.А.* Древнеегипетский храм. М.: Наука, 1979. 198 с.
11. Всеобщая история архитектуры. М.: Стройиздат, 1973. Т. 2. 712 с.
12. *Виолле ле Дюк.* Беседы об архитектуре. М.: Академия архитектуры, 1937. Т. 1. 478 с.
13. *Шуази О.* История архитектуры. М.: Академия архитектуры. 1934. Т.1. 576 с.
14. *Брунов Н.И.* Эрехтейон. М.: Изд-во Всесоюзной Академии архитектуры. 1938. 12 с.
15. *Башкиров А.С.* Антисейсмизм древней архитектуры. Т. 4. Юг СССР. Калинин: Изд-во пед. ин-та, 1948, 398 с.
16. *Даниеле Барбаро.* Десять книг об архитектуре Витрувия. М.: Академия архитектуры, 1938. 478 с.
17. *Башкиров А.С.* Антисейсмизм древней архитектуры. Т. 3, Италия. Калинин: Изд-во педагогического ин-та. 1948. 294 с.
18. *Кузнецов А.В.* Тектоника и конструкция центральных зданий. М.: Архитектура и градостроительство, 1951. 274 с.
19. *Якобсон А.Л.* Закономерности в развитии раннесредневековой архитектуры. Л.: Наука, 1983. 172 с.
20. Всеобщая история архитектуры. М.: Стройиздат, 1966. Т.3. 688 с.
21. *Мнацаканян С.Х.* Крестово-купольные композиции Армении и Византии V—VII вв. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1989. 150 с.
22. Всеобщая история архитектуры. М.: Стройиздат, 1971. Т. 9. 644 с.
23. *Самян А.А.* Архитектура античных сооружений Гарни. Ереван: Советакан Грох, 1988. 230 с.
24. *Токарский Н.М.* Архитектура древней Армении. Ереван: Изд-во АН АрмССР. 1946. 382 с.
25. *Токарский Н.М.* Архитектура Армении IV—XIV вв. Ереван: Армгосиздат, 1961. 388 с.
26. *Азатян Ш.Р.* Армянские порталы. Ереван: Советакан грох, 1987. 56 с.
27. *Марутян Т.А.* Архитектурные памятники. Ереван: Хорурдпан Грох, 1989. 270 с.
28. *Гольдштейн А.Ф.* Башни в горах. М.: Сов. художник, 1977. 334 с.

29. Топрак-кала. Дворец. М.: Наука, 1984. 304 с.
30. Бачинский Н.М. Антисейсмика в архитектурных памятниках Средней Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 48 с.
31. Прибыткова А.М. Памятники архитектуры XI века в Туркмении. М.: Стройиздат. 1955. 120 с.
32. Немцева Н.Б., Шаб Ю.З. Ансамбль Шах- и Зинда. Ташкент: Изд-во им. Гафура Гуляма, 1979. 168 с.
33. Пугаченкова Г.А., Ремпель Л.И. Выдающиеся памятники архитектуры Узбекистана. Ташкент: Худож. лит. УзССР, 1958. 292 с.
34. Булатов М.С. Геометрическая гармонизация в архитектуре Средней Азии IX — XV вв. М.: Наука, 1988. 362 с.
35. Якубовский А.Ю. Развалины Ургенча. Л.: Изд-во Академии истории культуры. 1930. 78 с.
36. Бачинский Н.М. Архитектурные памятники Туркмении. М.; Ашхабад: Акад. архитектуры СССР, 1939. Вып. 1. 128 с.
37. Нурмухамедов Н.Б. Архитектурный комплекс Ахмеда Ясави. Алма-Ата, 1988. 168 с.
38. Массон М.Е. Мавзолей Ходжа Ахмета Ясави. Ташкент: Узполиграфтрест, 1930. 26 с.
39. Маньковская Л. Хива. Ташкент: Изд-во им. Гафура Гуляма, 1982. 264 с.
40. Проектирование сейсмостойких зданий. М.: Стройиздат, 1971. 256 с.
41. Домбровский Ю.О. Факультет ненужных вещей. М.: Сов. писатель, 1989. 718 с.
42. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. М.: Стройиздат, 1978. 312 с.
43. Проскурин В.Н. Зодчие. 125 лет А.П. Зенкову. Алма-Ата: Общество охраны памятников истории и культуры Казахской ССР, 1988. 24 с.
44. Кузнецов А.В. Своды и их декор. М.: Академия архитектуры, 1938. 420 с.
45. Шульц П.Н. Мавзолей Неаполя скифского. М.: Искусство, 1953. 88 с.
46. Шуази О. История архитектуры. М.: Академия архитектуры 1937. Т. 2. 694 с.
47. Кириков Б.А. Древнейшие и новейшие сейсмостойкие конструкции. М.: Наука, 1990. 70 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| Предисловие .....                                    | 3   |
| <b>Что такое сейсмостойкое здание?</b> .....         | 4   |
| Немного о том, о чем здесь не будет рассказано ..... | 4   |
| Основные принципы сейсмостойкого строительства ..... | 5   |
| Как здания делаются сейсмостойкими? .....            | 8   |
| <b>Мудрость древнейших из древних</b> .....          | 11  |
| В те незапамятные времена .....                      | 11  |
| На чем стояли вавилонские башни .....                | 12  |
| Сейсмостойкость троянского коня .....                | 17  |
| Закон всемирного тяготения вместо цемента .....      | 22  |
| <b>Одним словом — греки</b> .....                    | 28  |
| Антисейсмические конструкции древних греков .....    | 28  |
| Храмы. . . Храмы. . . ..                             | 32  |
| Древнее Причерноморье .....                          | 40  |
| <b>Рим и Византия</b> . . . *                        | 47  |
| Вечный союз бетона и арки .....                      | 47  |
| Купола. . . Купола .....                             | 52  |
| Виртуозы кирпича .....                               | 62  |
| <b>На Кавказе со времени Ноя</b> .....               | 68  |
| Сейсмостойкость армянских храмов .....               | 68  |
| Башни в горах .....                                  | 79  |
| Огни и башни Апшерона .....                          | 82  |
| <b>Чудеса сейсмостойкости в Средней Азии</b> .....   | 87  |
| Доисторические времена .....                         | 87  |
| Стандартный набор антисейсмических мероприятий ..... | 90  |
| Мастера кирпичной кладки .....                       | 92  |
| Многошарнирная колонна .....                         | 102 |
| <b>В царстве дерева</b> .....                        | 104 |
| Русская изба и японская пагода .....                 | 104 |
| Деревянный Кафедральный собор .....                  | 110 |
| Все оставшееся дерево .....                          | 114 |
| <b>О чем нужно еще рассказать</b> .....              | 116 |
| <b>Современное сейсмостойкое строительство</b> ..... | 123 |
| <b>Заключение</b> .....                              | 132 |
| <b>Литература</b> .....                              | 133 |

## CONTENTS

|  |     |
|--|-----|
| <b>Preface</b> .....   | 3   |
| <b>What is an Earthquake-resistant Building?</b> .....         | 4   |
| Something about What Will Not Be Told .....                    | 4   |
| Main Principles of Aseismic Construction .....                 | 5   |
| How Buildings Are Made Earthquake-resistant? .....             | 8   |
| <b>Wisdom of the Ancient among Ancient</b> .....               | 11  |
| At Those Immemorial Times .....                                | 11  |
| Foundations of Babylonian Towers .....                         | 12  |
| Earthquake Resistance of the Trojan Horse .....                | 17  |
| Gravity Instead of Cement .....                                | 22  |
| <b>Greeks As They Were</b> .....                               | 28  |
| Seismic resistant structures of ancient Greeks .....           | 28  |
| Temples. . . Temples .....                                     | 32  |
| At the Ancient Black Sea Coast .....                           | 40  |
| <b>Rome and Byzantium</b> .....                                | 47  |
| Eternal Union of Concrete and Arch .....                       | 47  |
| Domes. . . Domes .....   | 52  |
| Masters of Bricklaying .....                                   | 62  |
| <b>In the Caucasus from Noah's Time</b> .....                  | 68  |
| Earthquake Resistance of Armenian Temples .....                | 68  |
| Towers in Mountains .....                                      | 79  |
| Lights and Towers of Apsheron .....                            | 82  |
| <b>Wonders of Earthquake Engineering in Central Asia</b> ..... | 87  |
| Prehistoric Times .....  | 87  |
| Some Cunning Tricks against Earthquakes .....                  | 90  |
| Bricklaying Masters Again .....                                | 92  |
| Column with many hinges .....                                  | 102 |
| <b>In the Realm of Wood</b> .....                              | 104 |
| Russian Izba and Japanese Pagoda .....                         | 104 |
| Wooden Cathedral .....   | 110 |
| Something Else About Wood .....                                | 114 |
| <b>What Is Still to Be Told about</b> .....                    | 116 |
| <b>Modern Aseismic Construction</b> .....                      | 123 |
| <b>Concluding Word</b> .....                                   | 132 |
| <b>References</b> .....  | 133 |

