

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ В РУССКОЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

Э. Г. ЦЫГАНКОВА (Киев)

Определение размеров отдельных деталей сооружений, построенных в России (зданий, плотин и т. п.) в XIV—XVIII вв. обязательно увязывалось с другими их габаритами и функциональными особенностями сооружений. Форма сооружения является одновременно архитектурной и конструктивной; в ней заложена информация о знаниях и мастерстве зодчего, который на ранних этапах каждый размер сооружения определял в соотношении с размерами других частей здания, т. е. с помощью некоторого модуля. В русском зодчестве сложилась своеобразная модульная система, получившая название «размерности», которая была обнаружена в результате анализа большого числа замеров памятников русской архитектуры. Остается, однако, невыясненным, каким образом определялись соотношения поперечных сечений, длин и высот при увеличении абсолютных размеров зданий, при переходе от дерева к камню и кирпичу, хотя такие задачи обязательно возникали в строительной практике (см. напр. [1]). До нас дошли, в частности, шатровые храмы, имеющие даже с современной точки зрения огромную высоту (40—50 м), но внутри совсем не высокие (5—6 м). Это объясняется конструктивными особенностями высоких покрытий шатров, требующих развитых и сложных связей, занимающих почти все пространство шатра [2]. В отдельных случаях довольно крупные шатры ставились вместе с восьмериком на своды; нагрузка при этом передавалась на пяты, как, например, в Спасской башне Казанского кремля, где первый ярус перекрыт сомкнутым сводом, на котором стоит второй ярус с шатровым перекрытием. Шатры ставили так, чтобы их кладка не занимала более $\frac{2}{3}$ толщины стены, что давало возможность погашать силы распора в массе кладки стен. Конструкция шатра облегчалась многочисленными окнами. В некоторых случаях толщина шатра уменьшалась по высоте.

Исследователь русского зодчества А. А. Тиц на основании многочисленных проделанных им замеров замечает, что в ранних каменных постройках стены подклетных этажей, принимающих на себя вес всего строения, достигали в толщину 1 саж., к концу XVII в. их толщина уменьшается до 1 арш. В кирпичных зданиях стены подклета составляют $\frac{2}{3}$ — $\frac{1}{2}$ саж, в то время как стены верхних этажей были тоньше — 3,5—2,5 кирпича. Важно отметить, что высота сводов зависела от пролета: чем больше было перекрываемое помещение, тем больше его высота (средняя высота палат 4 м, позже — 3,6 м; одновременно уменьшались размеры помещений) [3].

Наиболее крупным строительным предприятием XVI в. было строительство Белого города Москвы, осуществленное под руководством прославленного зодчего Федора Коня в 1584—1593 гг. Остатки стены хорошо изучены, что позволяет сделать некоторые предположения о тех задачах, которые необходимо было решать в процессе работы [4]. Всякой постройке предшествует изучение грунтов. Один из древнейших способов определения сжимаемости грунта — испытание его ударами бабы или трамбовки, иногда — продолжительной нагрузкой. Конечно, эти способы приблизительны, тем не менее ими пользовались еще в середине прошлого века. Например, в месте упора быков Николаевского моста груз лежал полгода. Строителями учитывались свойства грунтовых вод, которые зимой вспучивают и распирают грунт, а летом его размывают. Грунт необходимо было исследовать и в глубину: из каких слоев он состоит, какова их толщина, направление и покатость, наличие пустот. Это делалось в основном путем рытья колодцев и забивания свай. Иногда брали бревно футов 6—7 длиной и били им по грунту, состав которого определялся на слух по звучанию ударов. Рытье колодцев в

свою очередь предполагает крепежные сооружения — рамы, обшивку. В большинстве случаев скалу выравнивали под фундамент перпендикулярно к направлению давления (в наклонной скале вырубались ступени); в случае песчаного грунта необходимая его толщина определялась в зависимости от веса строения.

Сваи применялись тогда, когда верхние слои грунта слабо сопротивлялись давлению постройки; их концы должны передавать давление на материк. В других случаях, когда сваи не могли достичь материка, их забивали частоколом с целью уплотнить грунт. Для этого строителю необходимо было решить по крайней мере четыре задачи: определить число, порядок размещения и толщину свай, найти вес бабы и высоту ее подъема, определить длину забиваемой сваи и решить, какие для этого необходимы орудия и способы.

Если забивать сваи слишком близко одну к другой, то будет нарушена связь между частицами земли; если же забивать их далеко одну от другой, то равномерная передача давления строения на сваи становилась затруднительной, а то и просто невозможной, в связи с несовершенством перекрытий. Предельная нагрузка на сваю, находящаяся в зависимости от сжимаемости грунта, от способности дерева сопротивляться давлению, была найдена эмпирически: она не должна была превышать 20 пуд. на каждый кв. дюйм сечения сваи, иначе свая дробилась. Было известно, что, чем значительнее масса свай по отношению к массе бабы, тем большая часть полезной работы уйдет на приведение в движение массы свай независимо от сопротивления грунта; чем меньше скорость в конце падения бабы, тем большая часть полезной работы будет поглощена колебанием грунта и т. п. В упругих грунтах, например в глине с водой, забить сваю легкой бабой совершенно невозможно.

Федор Конь, конечно, знал, что избежать неравномерной осадки постройки можно в том случае, если при построении стены сначала возводить наиболее грузные части (например, башни), а более легкие — возводить только тогда, когда первые дадут усадку. Чтобы уменьшить давление на единицу площади, следует расширить подошву основания. Такие крепостные сооружения имели не только большой вес, но и большую протяженность, отдельные отрезки стен сооружались на различных грунтах, имели специальные проемы для пропуска речной и сточной воды. Едва ли могли существовать рецепты на все случаи, скорее всего зодчему приходилось решать многочисленные инженерные задачи такой сложности, что их решения не были найдены и во второй половине XIX в. В известном руководстве середины прошлого столетия указывалось: «Устройство оснований в случае, когда грунт под строением представляет различные свойства, очень затруднительно, потому что под строением придется делать разнообразные основания и согласовывать их так, чтобы строение дало по всей площади равномерную осадку. Правил для устройства оснований в таком случае никаких дать нельзя... Недостаток нужных данных в этом случае заменяется практикою, верным взглядом, умеющим оценить обстоятельства, сопровождающие постройку, и сноровкою — все это не описывается» [5, с. 90—91].

Интересные наблюдения относительно механики русских зодчих сделаны О. И. Брайцевой [6] в процессе изучения строгановских построек рубежа XVII—XVIII вв. На примере Введенского собора в Сольвычегодске (1689—1693) видно, как неизвестный мастер распределяет усилия распора. Глубокие распалубки, прорезая лотки свода, освобождают центральные части четверика от распорных усилий. Уменьшение распора обеспечивает параболическая форма свода и двухъярусная система металлических затяжек. Элементами, несущими тяжесть свода четверика, становятся столбы-пилястры. Простенки имеют в плане форму, близкую к тавровому сечению, которая весьма устойчива к продольному изгибу и способствует устойчивости стен четверика. Во многих случаях стены делались разной толщины в зависимости от статических условий. Те стены, сопротивление которых действию усилий облегчается разного рода пристройками, делались обычно тоньше. В Рождественской церкви (Н. Новгород) четкое распределение усилий в материале достигается тем, что каждый объем перекрыт самостоятельной системой сводов, опирающихся на стены с равномерно чередующимися оконными проемами и т. д. Это означает, что зодчие разбирались в различных статических условиях и умели учитывать их на практике. Толщина стен сооружений зависела от типа сводчатых перекрытий. Там, где своды не возводились и перекрытие было бревенчатым, толщина стен была небольшой. Иногда предпринимались попытки про-

делать некоторые расчеты и вывести соответствующие зависимости. Так, из архивных материалов известно, что в 1638 г. при перестройке Сибирского приказа каменных дел подмастерье Трофилка Шарутин предлагал сделать стену сени в 2 кирпича, т. е. облегчить. При этом он исходил из соотношения толщины стены с типом перекрытия (проект не был принят). В другом случае каменных дел подмастерье Кондрат Мымрин, определив непрочность стен церкви Вознесения в г. Смоленске, предложил устроить над ней свод «котельной», дающий незначительный распор вследствие вытянутости вверх [7].

По данным ряда источников, в XVII в. существовали рукописные пособия по строительной технике, например, такие как «Книга, в коей описаны образцы столбам в церкви или в палате или у мостов каменных и поясы около столбов и около церкви» [8]. В этих пособиях давались сведения о размерах пят сводов и соответствующих им размерах толщины стен.

Архивные материалы сохранили для нас имена выдающихся плотинных мастеров — Семена Вакулина, Леонтия Злобина, Никифора Клеопина, Ф. Ф. Чеботарева и др. В силу природных особенностей русских рек при постройке плотин нельзя было заимствовать западноевропейский опыт, поэтому русские конструкции отличаются особенной самобытностью и оригинальностью. Имелись даже специальные руководства, к числу которых относится рукопись Григория Махотина «Книга мемориальная о заводском производстве», хранящаяся в фондах Государственного архива Свердловской области. В «Записке с очевидного дела, как надлежит под строение заводов места осматривать и по осмотре с какою предусмотрительностью строение плотины назначивать», собран свод приемов постройки плотин. Эта рукопись не единственна. В труде П. П. Аносова, относящемся к описанию Златоустовского завода (1819 г.), целая глава посвящена плотинам; в нем указано, как должно учитывать качество грунта, величину и падение реки, особенности наводнений, высоту берегов и т. д.

Большое количество плотин, построенных в XVIII и XIX в., сохранилось до наших дней, однако упоминания о плотинах вообще относятся к значительно более раннему времени. Например, в XIV—XV вв. в военных целях в случаях широких, заполненных водой рвов мосты заменялись плотинной (греблей).

В XVI в. стали строиться железоделательные заводы на базе водяного колеса; в частности, такой завод возник в Соловецком монастыре не позднее 1566 г. На заводах водяное колесо приводило в движение воздуходувные меха и молоты: «Да на ручью на пруду кузница с колесницею, в той кузнице: два наковальня в колодах, третье наковально в каменю, да молот большой именуемый казак, которым тянут железо водою. В той же кузнице: два горна, да четыре меха кожаные... Подле тое кузницы стоит домница, в ней четыре печи, где кричное железо из руды варят» [Цит. по: 9, с. 33]. Павел Алеппский свидетельствовал, что в 1654 г. на Украине он видел «...мельницы с удивительными двигательными снарядами, как и во всех других мельницах этих стран: поток воды низвергается сверху и приводит во вращение наружные колеса, коих ось вертит мельницы для размельчения пшеницы. Есть также снаряды, которые приводят в действие толчен для ржи и ячменя, при чем песты то поднимаются, то опускаются в ступы» [10, с. 28].

Долгое время применялся способ устройства плотин, известный еще римлянам, по принципу «бездонных ящиков». Построенные из брусев ящики опускались в воду и удерживались цепями, пока их не заполняли камнем или щебенкой, позже — бетоном. Перед опусканием ящика покрывающий материк грунт расчищался или же в дне делалось углубление по форме его днища. Для устройства молов употреблялись ящики с дном, которые изготовлялись на берегу, затем ставились на воду, после чего внутри их делали каменную кладку, под тяжестью которой они постепенно опускались на дно. Такой способ был в употреблении и в XIX в.

Другой способ устройства плотин — из накидной массы камней — применялся в случаях прочных, не дающих осадки грунтов. Для такой плотины выбирался соответствующий камень, способный устоять против размывающего и химического воздействия воды, а также имеющий достаточный вес для сопротивления движению воды. Плотинные мастера знали, что камни должны иметь форму многогранника для лучшей устойчивости; профиль основания выбирался в зависимости от глубины, силы течения и ударов волн, от величины угла, образуемого перемычкой и направлением течения. Ряжевая плотина и водяная мельница были на Усть-Рудницкой стекольной фабрике, где

производство организовал М. В. Ломоносов. В его учебнике горнозаводского дела 1763 г. приводится описание и чертежи гидросиловых горных и металлургических установок.

Длина и высота плотины зависят от существующего дебита реки (количество воды, протекающей в определенный отрезок времени), общего режима реки, сезонности колебаний, ширины, конфигурации ее берегов и топографии окружающей местности. Эти зависимости определялись опытным путем, на глаз, что приводило иногда к грубым ошибкам. Например, в XVII в. заводы р. Тулицы были расположены так близко один к другому (300—400 саж.), что не давали возможности создать нормальный уровень на всех плотинах, которые были одинаковой высоты. В период паводков слишком большая протяженность плотин создавала аварийные ситуации. Однако плотинные мастера были наблюдательны: при постройке четвертого тульского завода (1655 г.) расчеты были учтены.

Анализ старинных плотин (А. И. Гамбаров) показал, что их устроители учитывали важнейшие зависимости: чем уже река и ниже ее берега, тем большей длины возводилась плотина. Этим обеспечивался необходимый подпор воды.

В тульско-каширской группе плотин была установлена высота в 3 саж. Все они покоились на фундаменте из березовых или дубовых свай и земляной или шлаковой насыпи. Более ранние плотины сооружались террасами, впоследствии был принят профиль трапеции шириной у основания до 14 саж., сверху — 7 саж. Для спуска воды устраивался «вешняк», т. е. сквозной проход в теле плотины шириной до 6 саж., усиленный дубовыми брусьями. Каждый «вешняк» снабжался особым запором или воротами; поверху прокладывался дубовый мост [11].

Древнейшим видом плотин на Руси были ряжевые (плотины). Ряжи представляли собой деревянные срубы с дном, проницаемым для воды, внутри которых производилась накидная кладка. Старинная русская традиция сооружения подобных оснований существовала и в более позднее время. Так, первая морская русская крепость Кроншлот (Ф. Я. Нестерук), сооруженная в 1703—1704 гг. по проекту Петра I, была построена именно с использованием опыта русских мастеров: на берегу были изготовлены ящики высотой в 3 м из бревен диаметром 66 см и длиной 9 м. Они были доставлены по льду, загружены камнем, и весной опущены на дно залива. На этом фундаменте была построена деревянная трехъярусная башня с 30 орудиями [12].

Подобным образом были укреплены берега р. Вычегды у Сольвычегодского Благовещенского собора (1650 г.). Особые деревянные укрепления «обрубы» представляли собой бревенчатые ящики, засыпанные землей и обшитые снаружи толстыми деревянными брусьями.

* * *

Ввиду недостаточности данных о преемственности технических решений вопрос о формах передачи этих знаний в практической механике изучен пока недостаточно.

У отдельных мастеров встречаются виртуозные решения, почти всегда основанные на предшествующем опыте. Так, свою знаменитую модель моста (1775—1776) И. П. Кулибин построил по принципу арочной фермы постоянной высоты с заделанными пятнами и многорешетчатым заполнением. Он увидел сходство между аркой и парой стропильных ног, связанных в замке и имеющих неподвижные опоры. Нам известно также, что Кулибин сознательно обращался к уже существующим техническим решениям: проектируя самоходное судно с шестовым «движителем», он изучал модель копра, движение и устройство рам на пильных мельницах, механику перекрытий. Однако, в целом остается неизвестным, как техническая идея переходила из одной области техники в другую, от одного мастера к другому. Исследования такого рода могли бы значительно углубить наши представления о практической механике прошлого.

Литература

1. Галилей Г. Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению.— Соч., т. I. М.— Л.: ГТТИ, 1934.

2. *Ащепков Е. А.* Русское деревянное зодчество. М.: Госстройиздат, 1950.
3. *Тиц А. А.* Русское каменное жилое зодчество XVII века. М.: Наука, 1966.
4. *Косточкин В. В.* Государев мастер Федор Конь. М.: Наука, 1964.
5. *Карлович В.* Основания и фундамент. СПб., 1869.
6. *Брайцева О. И.* Строгановские постройки рубежа XVII—XVIII вв. М.: Стройиздат, 1977.
7. *Милославский М. Г.* Техника деревянного зодчества на Руси в XVI—XVII вв.—Тр. ИИЕТ, 1956, т. 7, с. 44—111.
8. *Богоявленский.* О Пушкарском приказе.—В кн.: Сборник статей в честь М. К. Любавского. Пг., 1917.
9. Бюллетень Северо-Восточного областного Бюро краеведения. Вып. 2. Архангельск, 1926.
10. Путешествие антиохийского патриарха Макария в Россию в половине XVII века, описанное его сыном архидиаконом Павлом Алеппским. Вып. 2. М., 1897. (Пер. с арабск.)
11. *Гамбаров А. И.* Основное оборудование мануфактурной металлургии в России в XVII в.—Архив истории науки и техники. Вып. 7. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1935, с. 181—227.
12. *Нестерук Ф. Я.* Гидротехнические работы в Петербурге в XVIII в.—В кн.: Труды Института истории естествознания и техники. Т. 7. М., 1956, с. 120—135.