**Теории прочности в эпоху Возрождения**

Александр Акопов, Валентин Зацаринный

**Почему большая машина слабее маленькой?**

Полторы тысячи лет прошло со времени исчезновения с лица земли шести из семи чудес света, когда Леонардо да Винчи начал эксперименты по изучению прочности материалов. Несколько тысяч лет зодчие рассчитывали прочность, главным образом, опираясь на интуицию. С опытов Леонардо начался экспериментальный период в развитии строительной механики. Жизнь великого художника, исследователя, инженера из крохотного итальянского городка Винчи, титана эпохи Возрождения, достаточно подробно освещена во многих книгах. Мы остановимся лишь на той стороне его деятельности, которая непосредственно связана с предметом нашего повествования.

Леонардо был неутомимым экспериментатором. Производя многочисленные опыты, он фиксировал все в своих записных книжках. Всякий раз он начинал с вопроса, который представлял собой как бы программу предстоящего опыта. Например: "Если нить в 1 локоть поддерживает 10 фунтов, то сколько фунтов поддержит нить такой же толщины, но длиной в 100 локтей?"; "Если деревянная опора поддерживает 100 фунтов, сколько поддерживает 10 таких же деревянных опор, тесно связанных вместе?"; "Если 1 балка поддерживает 1000 фунтов, то сколько поддерживают 4 балки, положенные одна над другой?" Ставя, таким образом, задачу, Леонардо часто сразу же решал ее так, как, по его мнению, подсказывал ход рассуждений. После этого он приступал непосредственно к опыту и уже тогда фиксировал полученные данные и общий вывод. Вызывает удивление тщательность, с которой описывались условия и технология производства эксперимента.

Леонардо испытывал на изгиб балки на двух опорах, консольные балки, колонны. Он пришел к выводу, что "несколько малых опор, соединенных вместе, выдержат больший вес, чем если они будут разделены. Например, 1000 столбиков одной к той же толщины и длины, если ты поставишь каждый из них вертикально, согнутся под нагрузкой какой-нибудь одной единицы веса; если же ты свяжешь их вместе так, чтобы связки заставляли их соприкасаться, то каждый из столбиков сможет выдерживать, не сгибаясь, в 12 раз больший вес, чем раньше".

Опыты Леонардо с прутьями дали возможность судить о влиянии устойчивости на прочность. "Пусть к вершине прута приложен вес в 1 динар, ты увидишь, что он согнется до земли, но возьми 1000 этих прутьев и туго свяжи их вместе, и укрепи их снизу и сравняй их сверху, и ты увидишь, что в то время как по первому соображению они должны были бы выдерживать около 3,5 фунта, они будут выдерживать более 40". Значительное увеличение прочности в опытах с опорами и прутьями, зафиксированное Леонардо, происходило за счет увеличения жесткости, вместе с которой резко возросла устойчивость. Теория объяснила это через три века.

Леонардо да Винчи проводил интересные испытания на растяжение металлических проволок, лютневых струн, различных волокон. Он сконструировал оригинальное приспособление для определения сопротивления железной проволоки разрыву. "Укрепив железную проволоку длиной в два локтя на чем-либо так, чтобы она крепко держалась, затем, подвесив к ней корзину, ящик или что-либо подобное, через малое отверстие на дне воронки насыпать туда некоторое количество мелкого песку. Как только проволока лопнет, отверстие воронки закроется укрепленной на ней пружиной. Падая, корзина не опрокинется, так как она падает с небольшой высоты. Вес песка и место разрыва проволоки следует заметить". Далее предполагалось повторить опыт многократно при разной длине проволоки.

Конечно, не все выводы Леонардо правильны, есть в них противоречия, ошибки. Не всегда соблюдалась чистота эксперимента. Поэтому вряд ли можно говорить о значительной практической или теоретической ценности этих опытов, тем более что его материалы в то время не были опубликованы. Однако они имеют немалое значение для истории механики. Оно состоит в том, что впервые поиск прочности приобрел форму сознательного, специально заданного исследования.

Новый значительный шаг в развитии представлений о прочности через 120 лет после Леонардо да Винчи суждено было сделать еще одному титану Возрождения - Галилею.

Великий итальянский физик, механик, астроном и литератор Галилео Галилей признан одним из основоположников естествознания. Более 20 лет он возглавлял кафедру математики вначале в Пизанском университете, а затем в Падуе. Галилей интересовался многими отраслями науки, но наиболее значительное в его деятельности связано с астрономией.

Сконструировав небольшой телескоп, а вернее сказать, подзорную трубу с увеличением в 32 раза, Галилей стал наблюдать звездное небо и обнаружил на нем много нового и удивительного. Он открыл фазы Венеры, описал строение Сатурна, увидел солнечные пятна. Оказалось, Луна изрезана кратерами и вулканами, поэтому ее поверхность имеет большие неровности. У Юпитера он насчитал четыре спутника. В телескоп вместо одной звезды, видимой невооруженным глазом, можно обнаружить целое скопление. И вообще в поле зрения человека оказались новые звезды! Свои наблюдения Галилей описал в трактате "Звездный вестник".

Естественно, великий Галилей не мог только наблюдать и описывать небесные тела. Он задумывается над системой мира по Копернику и признает ее верной, пропагандирует ее в лекциях, частных беседах и, письмах. Но в 1616 г. учение Коперника официально признано еретическим, и Галилею предложили прекратить выступления в его защиту. Формально Галилей смирился с требованиями инквизиции, и в его университетских лекциях давалась система Птолемея. Однако в то же время он стал добиваться перед папой отмены запрета на учение Коперника. Галилей создает свой знаменитый "Диалог о двух главнейших системах мира", где в разговорах трех собеседников подробно анализируются системы мира по представлениям Птолемея и Коперника. Папа Урбан VIII дает согласие на это при условии, что учение Коперника будет подано в ней как одна из гипотез. В январе 1632 г. "Диалог" вышел в свет. Книга Галилея произвела огромное впечатление на современников. Преимущество коперникова учения сразу стало очевидным. Через несколько месяцев книгу изъяли из продажи и запретили, а в 1633 г. на четырех допросах - с 12 апреля по 22 июля -Галилео Галилей произнес публичное покаяние, отрекшись от своих взглядов. Ему было запрещено писать и говорить о движении Земли. Как "узник инквизиции" Галилей отправился в свою виллу в Арчетри близ Флоренции, где в уединении провел безвыездно последние годы жизни. Умер он в 1642 г. Похоронили его без почестей, на могиле не поставили памятника. И лишь через 95 лет была исполнена последняя воля великого ученого: прах его был перенесен во Флоренцию и похоронен в церкви Санта-Кроче, рядом с могилой Микеланджело.

Вот этот последний период своей жизни "великий еретик" и посвятил исследованиям в области механики. Измученный болезнями, с ухудшающимся зрением, а затем и вовсе слепой, Галилей создает свой великий труд "Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению". В эту работу 74-летнего ученого вошли его наблюдения и рассуждения, опыты, исследования, производимые им в разные годы жизни. Книга была издана на итальянском языке в голландском городе Лейдене в 1638 г.

Величайшая заслуга Галилея заключается в том, что он положил начало развитию двух разделов механики - динамики и сопротивления материалов как самостоятельных наук. Надо отдать должное издателям, которые сумели достойно оценить труд Галилея. В предисловии к лейденскому изданию говорилось, что Галилей "открыл две новые науки и доказал наглядно-геометрически принципы их основания. Что должно сделать это сочинение еще более достойным удивления, это то, что одна из наук касается предмета вечного, имеющего первейшее значение в природе, обсуждавшегося великими философами и изложенного во множестве уже написанных томов, короче сказать, движения падающих тел - предмета, по поводу которого автором изложено множество удивительных случаев, которые до сего времени оставались никем не открытыми или не доказанными. Другая наука, также развитая из основных ее принципов, касается сопротивления, оказываемого твердыми телами силе, стремящейся их сломить, а также изобилует примерами и предложениями, остававшимися до сих пор никем не замеченными".

Великий Галилей вошел в историю прежде всего как астроном. Общеизвестна его борьба за учение Коперника, печальной страницей его биографии явилось отречение от этого учения. Заслужили признание многие стороны деятельности Галилея, в частности, его открытия в области динамики (Лагранж утверждал, что "первые ее основы заложены Галилеем"), А вот его работы в области сопротивления материалов менее известны. Между тем именно Галилей свел большой круг вопросов, связанных с прочностью и разрушением материалов, в одну область знания. Он впервые указал на необходимость построения собственной теории, создания собственной науки - сопротивления материалов.

Один вопрос мучил Галилея давно. Как-то он наблюдал за постройкой галер. Когда было решено построить галеру значительных размеров, мастера решили эту проблему весьма просто. Они увеличили вдвое каждый элемент и соединение, создав галеру, вдвое большую, но абсолютно подобную обычной. Каково же было изумление строителей, да и самого Галилея, когда большая галера разрушилась, не начав плаванья. Вспоминая об этом в Арчетри, он снова и снова задавал себе один и тот же вопрос: "Почему при соответственном увеличении материала не возрастает в той же мере способность сопротивления?" Почему один гвоздь вдвое толще другого может выдержать груз в 3-4 раза, а может быть, в 8 раз больший, чем первый, рассуждал Галилей, а здесь этого не происходит?

Сегодня мы знаем, что неверно сравнивать гвоздь с галерой, ибо гвоздь - это элемент, а галера - конструкция, и в ней по сравнению с элементом прочность резко снижается. К тому же, гвоздь и галера были изготовлены из различных материалов и под нагрузкой вели себя по-разному. Но по отношению друг к другу одинаковых конструкций - галер - Галилей сделал правильный вывод: "Если мы, отвлекшись от всякого несовершенства материи и предположив таковую неизменяемой и лишенной всяких случайных недостатков, построим большую машину из того же самого материала и точно сохраним все пропорции меньшей, то в силу самого свойства материи мы получим машину, соответствующую меньшей во всех отношениях, кроме прочности и сопротивляемости внешнему воздействию: в этом отношении, чем больше будет она по размеру, тем менее будет она прочна". Галилей считал: "Если имеется балка с определенным соотношением толщины к длине, допустим 1:100, то не может существовать ни одной другой балки из того же материала, которая будет сопротивляться так же. Если балка будет больше размерами, она будет ломаться от собственного веса, если меньше - сможет выдержать какой-либо груз дополнительно" (рис. 1).

Это явление, названное впоследствии масштабным фактором, учитывается и сейчас в расчетах строительной механики. В действующих советских стандартах на испытание строительных материалов вводятся переводные коэффициенты для показателя прочности. Чем меньше лабораторный образец, тем больший уменьшающий коэффициент надо вводить, чтобы получить прочность промышленного элемента или конструкции.

Обнаружив, что одна и та же пластинка сопротивляется изгибу значительно лучше, будучи поставленной на ребро, Галилей задолго до появления понятия момента инерции сечения пытался геометрически обосновать это явление.

Галилей предлагал использовать пустотелые элементы - трубы металлические и деревянные, сравнивая их с созданием природы - костями птиц и животных, тростником, стеблем растения. Он заключает, что при сравнении сплошной и трубчатой балок, имеющих одинаковую площадь сечения, трубчатая будет во столько раз прочнее, во сколько диаметр трубы больше диаметра сплошной балки.

Галилей изучал только два вида деформации - растяжение и изгиб на всевозможных элементах из различных материалов, объясняя причины их прочности и разрушения. "Подобно тому, как в веревке мы приписываем ее сопротивление множеству составляющих ее нитей пеньки, так и в дереве мы находим продольные волокна и нити, делающие его более прочным, нежели пеньковая веревка такой же толщины. Что касается цилиндра из камня или металла, то еще большая связанность их частей зависит от другой причины, отличной от нитей и волокон; но и эти материалы также могут быть разорваны сильным растягиванием". Даже водяной столб во всасывающем насосе Галилей рассматривает как элемент, работающий на растяжение и разрывающийся при увеличении нагрузки выше определенного предела.

Нужно помнить, что Галилей во всех случаях изучал состояние материалов в момент разрушения. Прочность, по Галилею, была связана с критическим, предельным состоянием элемента. Ученый пытался понять, почему колонна или балка разрушается, какая сила вызывает это разрушение? Каковы должны быть форма, геометрические размеры и условия работы элемента, чтобы он не разрушался? Поведение же нагруженного элемента в нормальном рабочем состоянии, физико-механические процессы, происходящие при обычных нагрузках, были Галилею неведомы. Его представление о прочности тел и закономерности разрушения, на первый взгляд, было весьма упрощенным: тело разрушается в том случае, когда действующая на него растягивающая сила превзойдет предельную величину, постоянную для данного материала.

Галилей пытался выйти за рамки умозрительных рассуждений и при помощи математических доказательств прийти к теоретическому обобщению. Для этого ему не хватало математического аппарата и данных теоретической механики, поэтому нельзя сказать, что он построил теорию. Но он подготовил почву, на которой в дальнейшем выросла первая теория прочности.

Немногим позднее вопросами прочности твердых тел заинтересовался французский ученый Мариотт (1620-1684). В связи с задачами, возникшими при проектировании Версальского дворца, он проводит большие эксперименты по растяжению и изгибу самых разных материалов. Мариотт, изучая прочность деревянных и стеклянных балок, проверил результаты Галилея и убедился в их справедливости.

Необходимость создания надежного водопровода в Версале заставила Мариотта испытывать балки, жестко заделанные двумя концами. Он обнаружил, что прочность таких балок увеличивалась вдвое по сравнению со свободно опертыми балками.

Заливая водой трубы высотой до 30 м, Мариотт испытывал их внутренним давлением и получил формулы для расчета на прочность.

Опытами Мариотта заканчивается первый, экспериментальный период изучения сопротивления материалов. Результаты научных поисков этого периода принесли огромную пользу и не утратили своего значения до сих пор.

**Криптограмма Гука**

Наука набирала темпы. Росло число ученых. Возникла потребность в общении их друг с другом, в обмене мнениями, в обсуждении научных проблем. В разных странах Европы, раньше других в Италии, организуются научные общества. Уже в 1560 г. в Неаполе возникла Академия тайн природы, затем в Риме - Академия Линчеев, во Флоренции - Академия опытных знаний. В их работе принимал участие Галилей и его ученики - Торичелли и Вивиана. Позже научные общества возникли в Англии и Франции, еще позже - в России и Германии.

15 июня 1662 г. в Лондоне было официально открыто знаменитое Королевское общество. В число его первых членов вошли видные английские ученые, в том числе известный физик и химик Роберт Бойль. По рекомендации Бойля в Королевское общество был принят Роберт Гук. Бойль провел вместе с Гуком ряд исследований, в частности, работы по усовершенствованию насоса, и высоко оценил его как ученого.

Роберт Гук (1635-1703), сын провинциального священника с острова Уайт, с детства увлекался двумя вещами: устройством всякого рода механизмов и рисованием. После завершения обучения в Вестминстерской школе в 1653 г. он переехал в Оксфорд и поступил на работу в церковь в качестве певчего. Одновременно занимался в Оксфордском университете, специализируясь в области астрономии, и стал ассистентом Р. Бойля. Страсть к изобретательству, оригинальность мышления в сочетании с романтической увлеченностью и буйной фантазией позволили Гуку сделать множество открытий в самых различных областях знания. Гук сконструировал прибор для измерения силы ветра, приспособление для деления круга, ряд приборов для исследования морского дна, ареометр, проекционный фонарь, дождемер, пружинные часы. Он изобрел карданную передачу и систему зубчатых колес, которые теперь известны как вайтовы колеса. Он усовершенствовал зрительную трубу для измерения углов, телескоп, микроскоп, барометр и даже искусственные мышцы для полета в воздухе. Немало и других приборов, механизмов, приспособлений создал и улучшил талантливый механик Роберт Гук. Но это лишь небольшая часть его деятельности.

Гука, например, заслуженно признавали хорошим архитектором. После пожара в Лондоне в 1666 г. он создал проект восстановления и реконструкции города, а затем по поручению магистрата возглавил эти работы. По его проектам в Лондоне был построен ряд зданий, церквей и жилых домов. Самым значительным сооружением была знаменитая больница Бедлам, по праву считавшаяся гордостью лондонских жителей (название происходит от Beatlehem). Построенное еще в 1247 г. шерифом Лондона Симоном Фитцем Мари в качестве приюта для членов ордена "Звезды Бетлехем", это здание с 1330 г. использовалось как госпиталь, куда с 1403 г. начинают поступать и психические больные. В 1547 г. Бедлам был передан Лондону как больница для сумасшедших. Восстановленное по проекту Гука, это огромных размеров здание поражало гармонией пропорций, классической строгостью форм.

Впоследствии слава этой больницы обернулась бесславием из-за жестокого обращения с больными. Но Гук уже здесь не причем.

В годы работы в Королевском обществе Гук значительно обогащает всю деятельность этого учреждения, становясь вскоре его секретарем. Он издает труды Общества, следит за иностранными изобретениями, делает собственные изобретения, продолжает ставить много блестящих экспериментов, сопровождая их такими оригинальными идеями, которые нередко приводили к большим открытиям... других.

При всем этом жизнь Гука была очень нелегкой. Он постоянно нуждался. Ему приходилось занимать одновременно две должности и подрабатывать публичными лекциями, которые проходили всегда блестяще, хотя получал он за них гроши. Работая ассистентом у ряда видных ученых, Гук одновременно выступал в роли их учителя, натаскивая своих "шефов" по разным курсам смежных наук.

Будучи исключительно общительным человеком, Гук активно посещал кофейни, трактиры, аттракционы, базары, пристани, знакомился с разными людьми, беседовал с ними на самые различные темы. Особенно часто его можно было увидеть в порту, где он любил расспрашивать моряков и купцов, возвращавшихся из плавания, о разных странах, в том числе о Московии. В 1696 г. Гук выступил на заседании Королевского общества с докладом о новой карте "Татарии", под которой подразумевалась обширная территория, включающая значительную часть Урала и Сибири.

В 1665 г. был издан классический труд "Микрография", посвященный физической оптике и микроскопии. В эту работу вошли, в частности, результаты изучения Гуком клеточного строения растений. Он впервые ввел термин "клетка" и дал описание клеток целого ряда растений. Гук занимался волновой теорией света, провел глубокое исследование цветов тонких пластинок, описал явления дифракции и ряд других световых явлений.

Вместе с Гюйгенсом Гук установил постоянные температурные точки - таяния льда и кипения воды - и сконструировал термометр. Одной из наиболее значительных его работ была теория движения и взаимодействия небесных тел.

3 мая 1666 г. Роберт Гук сделал доклад в Королевском обществе. "Я намерен изложить систему мира,- говорил Гук,- весьма отличающуюся от всех до сих пор предложенных; она основывается на следующих трех положениях:

1. Все небесные тела не только обладают тяготением своих частей к их собственному общему центру, но притягиваются взаимно одно к другому внутри их сфер действия.

2. Все тела, совершая простое движение, будут продолжать двигаться по прямой линии, если только они не будут постоянно отклоняться от нее некоторой внешней силой, побуждающей их описывать окружность, эллипс или какую-либо иную кривую.

3. Это притяжение тем больше, чем тела ближе. Что же касается отношения, в котором эти силы уменьшаются с увеличением расстояния, то я сам не определил его, хотя и проделал с этой целью некоторые эксперименты. Предоставляю сделать это другим, у которых найдется для этой задачи достаточно времени и знаний".

Через восемь лет на эту тему вышла его работа под названием "Попытка доказательства годичного движения на основе наблюдения".

Таким образом, Гук в основном предвосхитил закон всемирного тяготения, открытый Исааком Ньютоном. Мало того, отношение между силой притяжения и расстоянием между телами, которое он советовал определить другим, было им фактически найдено. В письме Ньютону 6 января 1680 г. он пишет, правда, в качестве предположения, что сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами небесных тел.

Поэтому когда вышел из печати величайший труд И. Ньютона "Математические начала натуральной философии", началась печально известная тяжба Гука с Ньютоном за приоритет. В конце концов, Ньютон согласился однажды сослаться на Гука, и спор прекратился. Академик С. И. Вавилов в своей книге "Исаак Ньютон" писал: "Ньютон был, очевидно, не прав, скромные желания Гука имели полное основание. Написать "Начала" в XVII в. никто, кроме Ньютона, не мог, но нельзя оспаривать, что программа, план "Начал" был впервые написан Гуком. Бесцельная борьба с Ньютоном за приоритет набросила тень на славное имя Гука, но истории пора, спустя почти три века, отдать должное каждому. Гук не мог идти прямой безукоризненной дорогой "Математических начал" Ньютона, но своими окольными тропинками, следов которых нам теперь уже не найти, он пришел туда же".

Это далеко не единственный случай споров Гука за свой приоритет. Его исследования были настолько разносторонни и многогранны, что неизбежно вторгались в сферы деятельности других ученых, работавших, как сказали бы сейчас, на самых передовых рубежах науки. Но крайняя неуравновешенность, неустойчивость увлечений приводили к тому, что, находясь у истоков больших открытий, Гук редко доводил дело до конца.

И только один закон по праву носит его имя и принадлежит ему вне всякой конкуренции. Это закон упругости материальных тел, известный под названием закона Гука. Суть его можно выразить в трех словах: "Деформация пропорциональна нагрузке", или, как записал Гук в своей криптограмме: "Каково удлинение, такова и сила". Этот закон был выведен Гуком в 1676 г. после проведения ряда экспериментов, а именно:

а) удлинения железной проволоки;

б) растяжения винтовой пружины;

в) сокращения спиральной часовой пружины;

г) изгиба балки, закрепленной одним концом и нагруженной на другом конце.

Убедившись во всех опытах в действии своего закона, Гук признал его всеобщим. В 1678 г. он писал: "Около двух лет тому назад я опубликовал, в конце моей книги "Описание гелиоскопов", теорию в виде следующей криптограммы: ceiiino-sssttu, то есть ut tensio sic vis. Это означает, что сила всякой пружины пропорциональна ее растяжению. То есть, если сила растянет или согнет пружину на некоторую величину, то две силы согнут ее вдвое больше, три силы согнут втрое больше, и так далее".

В том же 1678 г. вышла из печати работа Гука "О восстановительной способности или об упругости", содержащая описание ряда опытов с упругими телами,- первая книга по теории упругости.

"Совершенно очевидно, - пишет Гук, - что правило или закон природы для всякого упругого тела состоит в том, что его сила или способность восстанавливать свое естественное состояние всегда пропорциональна той мере, на которую оно выведено из этого естественного состояния, совершено ли это путем его растяжения, отделения его частей одна от другой или же путем сгущения или уплотнения этих частей". Другими словами, независимо от вида нагрузки - растяжения ("разрежение, отделение частей тела") или сжатия ("уплотнения этих частей") - изменение размеров тела пропорционально приложенной силе. Для проверки этого положения Гук предлагал к проволокам разных длин привешивать гири и измерять удлинение. Сравнивая изменения нескольких проволок в зависимости от приложенного к ним веса, можно убедиться, по словам Гука, "что они всегда будут относиться друг к другу как вызвавшие их нагрузки".

Гук проводил много опытов с металлическими пружинами и деревянными балками. Изготовив консольную балку из дерева, он измерял ее прогиб под действием в различных частях разных весов. При этом он пришел, например, к важному выводу о том, что на выпуклой поверхности балки волокна при изгибе растягиваются, а на вогнутой - сжимаются. Прошло очень много времени, пока инженерам стало ясно значение этого, как теперь представляется, очевидного свойства материала.

Итак, деформация пропорциональна нагрузке. И наоборот.

Если от пудовой гири проволока растянется на 2 мм, то от двухпудовой она растянется на 4 мм. Если деревянный брус от той же пудовой гири сожмется на 1 мм, то от двухпудовой - на 2 мм (соответственно от трехпудовой - на 3 мм и т. д.) (рис. 2).

Гук считал, что его закон действует всегда: при любых нагрузках и в любых материалах. И здесь, в полном соответствии со своим характером, он не довел исследование до конца и допустил неточности. Мы вернемся к этому позже. Современники его не опровергли.

Главное, был сделан очень важный шаг. Был найден основной закон сопротивления материалов. Рассуждения Леонардо и Галилея постепенно становились на научную основу, благодаря которой со временем они будут описаны математическими формулами.