

# О ВКЛАДЕ В. Г. ШУХОВА В ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ\*

\*

В историю отечественной науки и техники В. Г. Шухов вошел как выдающийся исследователь и инженер, как человек, сочетавший в себе глубокие теоретические познания с блестящей конструкторской интуицией.

Шухов умел научно обосновывать каждую поставленную практическую задачу, умел сопоставить теоретические исследования с экспериментом. Он ввел в практику то, что в наши дни называется техническим расчетом. Без преувеличения можно сказать, что Шухов был великим инженером своего времени. Многие его идеи не потеряли значения и в наши дни. При создании того или иного инженерного сооружения он исходил не только из теоретических положений, но руководствовался также соображениями рентабельности и технической пригодности. Шухов прекрасно сочетал в себе и черты исследователя и качества инженера. Он обладал редким талантом доводить свои идеи и замыслы до практического осуществления.

Архивные материалы свидетельствуют, что на протяжении всей своей жизни все наиболее важные расчеты Шухов выполнял сам; он непосредственно руководил разработкой своих конструкций и осуществлением их на практике.

Значительное место в деятельности В. Г. Шухова занимают работы в области создания инженерных сооружений. Приведем в качестве примера Всероссийскую художественно-промышленную выставку 1896 г. в Нижнем Новгороде.

Здесь Шухов реализовал многие свои теоретические положения. «Современников поражали как легкие арочные строения, которые перекрывали главное здание машинного отдела..., так и оригинальные по позизке формы и легкости конструкции арочные и висячие системы Шухова, которые были впервые введены в практику строительного дела», — писал современник Шухова профессор Худяков. «Такая сетчатая поверхность, состоящая, так сказать, из одной обрешетки, не опиралась на какие-либо ствольные фермы, а покоилась непосредственно на стенах и колоннах зданий, отчего многие и называли эти покрытия Шухова крышами без стропил».

С большой оригинальностью была решена Шуховым задача

\* В статье использованы материалы Ю. К. Милонова.

покрытия круглого пространства над зданием машинного отдела диаметром 68 м. Верхнее стальное кольцо здания диаметром 25 м было заткнуто диафрагмой из листовой стали, а боковую поверхность образовавшегося усеченного конуса между верхним и нижним кольцами составляла сетка из стальных полос, склепанных в местах их пересечения. В ячейках сетки помещены плиты ромбической формы, отдельные секции которых изготовлялись на московском заводе котлоры Барн.

Самой замечательной частью сооружения была середина павильона. «Центральная часть здания покрыта вогнутой внутрь чашей из тонкого листового железа, края которой прикреплены к верхнему кольцу»\*, — писал П. К. Худяков. Он отметил, что в существующих курсах инженерного и строительного искусства бесспорно было бы искать на этот случай каких-либо указаний: «...подобные покрытия не могли быть созданы заурядными инженерами и архитекторами, имеющими хотя бы и большую практику по копированию существующих устройств; для этого нужна была особенная, неутомимая пылкость ума самостоятельного инженера, с полным сознанием отбрасывающего к каждой новой работе, которая проходит через его руки. Изыскание такой поверхности явилось у изобретателя результатом самостоятельного математического анализа».

Большой интерес у посетителей выставки вызвала гиперболическая водонапорная башня. При проектировании ее Шухов использовал известное в аналитической геометрии свойство образования поверхности однополостного гиперболоида при вращении прямой вокруг оси, которое до тех пор не находило применения в строительстве. Это позволило отказаться от трудоемких гнутых стальных элементов, дорогих и сложных в сборке. В 1906 г., т. е. десять лет спустя, гиперболоид был использован без указания приоритета Шухова для смотровых башен американского военного флота. В 1922 г. гиперболоид вращения был положен Шуховым в основу конструкции радиобашни в Москве на Шаболовке (знаменитая «Шуховская башня»).

На выставке были представлены также сетчатые ажурные покрытия Шухова, наиболее выразительным примером использования которых явился павильон Заводского ремесленного отдела. Составив цилиндрический свод из перекрещивающихся металлических элементов, расположенных наклонно к оси конструкции, он получил возможность придать ячейкам ромбического очертания такие размеры, чтобы кровля укладывалась непосредственно на получившийся каркас без применения прогонов. Небольшая длина отрезков стержней, составляющих контур ячеек, скреплен-

\* Первое подобное покрытие было выполнено Шуховым для здания с каменными стенами на котельном заводе Барн в Москве.

см. №10  
ИЗБР. Тр.  
Шухов

ных в местах пересечений, обеспечила их хорошее сопротивление ветрам. Стены сводами были покрыты 5 заданий пролетами от 13 до 32 м с общей площадью 20 000 м<sup>2</sup>.

Для характеристичности работ В. Г. Шухова в области теории расчета строительных конструкций приведем краткий анализ его труда «Стрелица» (1897 г.).

Изложенный в этой книге метод автор характеризует как «аналитический расчет стропильных ферм, который дает ответ на вопросы об определении усилий, воспринимаемых на себя различными частями фермы, об определении веса этих частей и о назначении в проекте наиболее выгодного геометрического расположения всех частей фермы, при котором вес употребленного на устройство фермы материала был бы наименьшим».

Сравнив математические выражения усилий горизонтального распора или напряжения затяжки и максимального изгибающего момента в произвольном сечении у ферм с прямыми ногами и параболическим очертанием, В. Г. Шухов делает вывод, что «если конструктору предоставлен свободный выбор поверхности крыши, то для получения наименьшего веса стропил следует остановиться на фермах параболических и отыскивать какой-либо другой вид ферм большего веса в таких случаях бесполезно».

Анализируя параболы различного очертания, он приходит к выводу, что «всякое отклонение от фермы, где вершина параболы совпадает со средним сечением фермы, с целью уменьшения сгибающих моментов нагруженной стороны непременно вызовет увеличение сгибающих моментов ненагруженной стороны фермы и наоборот». При этом значение сгибающего момента при смещении вершины параболы на одну четверть пролета будет вдвое больше, чем для параболы симметричной.

Разбирая вопрос о средствах уменьшения в параболических фермах сгибающих моментов, возникающих при односторонней нагрузке, В. Г. Шухов пришел к выводу о выгоде замены обычных применяемых в прямолинейных фермах раскосов системой наклонных тяг. Против раскосов он выдвигает те соображения, что «сжатие сжатых частей большой длины при слабых усилиях повлечет за собой слишком невыгодное употребление материала... а длины раскосов сжатия в арках будут больше, чем в прямолинейных фермах». В этом случае замена раскосов системой тяг или хорд, связывающих разные точки дуги с ее подошвами, представляет значительные выгоды как в экономии материала, так и по простоте работы.

Иногда из убеждения, что «подробный теоретический разбор расчета сетчатых арок с наклонными тягами потребовал бы весьма обширных выводов, которые приведут к конечным формулам, скорее всего вероятно, чем верным», В. Г. Шухов признал, что «стрелица» надежнее будет ограничиться в расчетах формулами,

основанными на предположении, что в местах привеса тяг существуют шарниры\*.

«При устройстве арок и их установке, — писал В. Г. Шухов, обосновывая свое решение проблемы, — необходимо обращать главное внимание на положение тяг». Потому что «избыточное натяжение их может вызвать появление добавочных усилий, на действие которых части фермы не рассчитаны; то же самое может произойти при чрезмерном ослаблении тяг». А «... для устранения возможного производа в натяжении тяг он рекомендует «употреблять... не жесткие стяжки, а предложенные нами упругие стяжки».

В. Г. Шухов умело выбирал арсенал математических средств для решения задач строительной механики, настойчиво пропагандируя наиболее эффективные из них. Так, например, обстояло дело с использованием общеизвестного теперь линейного дифференциального уравнения четвертого порядка для изгиба балок вообще и для лежащих на упругом основании в частности. Это уравнение еще в начале XVIII века можно найти в сочинениях членов Петербургской Академии наук Л. Эйлера и Д. Бернулли. В 1734 г. Эйлер предложил весьма общий способ интегрирования этого уравнения.

Начало применению упомянутого дифференциального уравнения в строительной механике было положено в 1867 г. Э. Виллером при решении частной задачи об изгибе железнодорожного рельса. А в 1876 г. А. Резаль воспользовался им для решения другой, но также лишь частной задачи — расчета стенки парового котла («Трактаты общей механики»). Использование этого уравнения при решении самых разнообразных задач строительной механики принадлежит уже В. Г. Шухову. Так в работе «Механические сооружения нефтяной промышленности», опубликованной в журнале Министерства путей сообщения «Инженер» в 1883 г., В. Г. Шухов расширил применение такого дифференциального уравнения, использовав его при расчете «железных резервуаров, служащих для хранения жидких тел». Естественно, что, рассматривая речную нефтеналивную баржу как плавающий брус, он воспользовался тем же уравнением.

«В течение 20 лет, истекших с появления моей первой статьи, — сообщал В. Г. Шухов, имея в виду свою работу «Механические сооружения нефтяной промышленности», — мне приходилось много раз применять это уравнение в практике при расчете балок и убедиться, что простота его приложения решает очень легко весьма сложные вопросы».

\* Расчет ферм с жесткими узлами (т. е. по существу рамных конструкций) был настолько сложен, что инженеры вынуждены были заменить его расчетом ферм как бы с идеальными шарнирами.

«Насколько мне известно, — указывал он в 1903 г. в книге \* «Уравнение  $EId^4y/dx^4 = -ay$  в задачах строительной механики», — в литературе по строительной механике не рассматривается вопрос о непосредственном приложении производной четвертого порядка к анализу изгиба прямых балок, а между тем применение это упрощает решение многих вопросов... и приводит к простому решению разнообразных задач».

Отметив, что «Уравнение есть частный случай общепринятого положения теории изгиба, гласящего, что для прямых брусьев производная 4-го порядка упругой линии выражает нагрузку на единицу длины», т. е.  $EId^4y/dx^4 = -q$ , В. Г. Шухов подчеркивает: «...если  $q$  постоянно или функция  $x$ , то уравнение решает все вопросы обыкновенных балок».

В той же статье В. Г. Шухов раскрывает, как последовательное интегрирование уравнения  $EId^4y/dx^4 = -q$  дает ряд уравнений убывающего порядка, позволяющих решить «вопрос о моментах, текущих усилиях и форме кривой в заданной балке». Говоря о случае неразрезной балки, он отмечает, что «при этом известное уравнение о трех моментах получается понуто». Уже позднее Ж. Буассиак (1885 г.) и А. Фешель (1898 г.) распространили применение этого уравнения на расчет бруса бесконечно большой длины, вычисление давления на прогоны моста и расчет распределения опорного давления мостовой фермы на каменную кладку.

О сделанном Шуховым теоретическом вкладе в науку впервые доложил гениальный русский ученый Н. Е. Жуковский в своем сообщении 6 марта 1904 г. в Математическом обществе, указав, в частности, что в статьях В. Г. Шухова представлен целый ряд вопросов строительной механики, «решение которых сводится к интегрированию уравнений четвертого порядка». Н. Е. Жуковский продемонстрировал решение разобранных В. Г. Шуховым задач на примерах расчета четырех вариантов упругого бруса, цилиндрического резервуара, наполненного жидкостью, и стенок цилиндрической огневой трубы парового котла с применением гиперболических функций \*\*. Не менее важным был оценен фундаментальный труд В. Г. Шухова «Стропила» (1897 г.).

В отзыве, данном В. Г. Шухову при его избрании в 1927 г. членом-корреспондентом Академии наук СССР, академики А. Н. Крылов и П. П. Лазарев отметили, что этот замечательный ученый «пришел к выработке своеобразного полугеометрического метода исследования, быстро ведущего к окончательным результатам».

\* Опубликованию этой книги предшествовала большая дискуссия В. Г. Шухова с Н. Естиным на страницах бюллетеней Политехнического общества (№ 5, 8 за 1902 г. и № 4, 7 за 1903 г.) (прим. ред. кол.).

\*\* В 1915 г. сообщение Н. Е. Жуковского было опубликовано (Математический сборник, 1915, т. 29, № 3) (прим. ред. кол.).

Особенно замечательным в исследованиях В. Г. Шухова было использование принципа аналогии в инженерной практике. Об одном из таких случаев использования писал в 1919 г. П. К. Худяков в статье о теоретических исследованиях ученого: «Инженер Шухов останавливается в своих работах прежде всего на инженерной аналогии, существующей между поворотом поперечного сечения у плавающего тела и поворотом поперечного сечения упруго согнутой балки. В обоих случаях этот поворот характеризуется действительно одними и теми же в сущности формулами». Аналогия с плавающим брусом дала В. Г. Шухову успешное и притом совершенно необычное решение задачи лежащего на песке днища железного резервуара. Шухов показал, что днища вертикальных резервуаров можно опирать непосредственно на землю и назначать толщину листов днища из конструктивных соображений.

После кончины Шухова прошло около сорока лет. Однако все помнят, что именно по проектам Шухова были созданы экспериментальные и промышленные установки крекинг-процесса, сооружены крупные резервуары и нефтеналивные баржи, танкеры, оригинальные пространственные покрытия двойной кривизны на заводе в Вилксе, дебаркадер Киевского вокзала в Москве, покрытия ряда сооружений, например, зданий ГУМа, ЦУМа, гостиницы «Метрополь» и многих других. Великолепным памятником великому инженеру служит гениально простая конструкция гиперболической башни на Шаболовке в Москве — первого высотного сооружения в нашей стране.

Идеи Шухова о переходе от балочных ферм с прогонами и связями к сетчатым пространственным конструкциям в наше время получили повсеместное признание и развитие. Прогрессивными конструкциями покрытий зданий разнообразного назначения и типоразмеров являются и сетчатые формы, которые могут быть образованы одной или двумя параллельными сетками, соединенными раскосной решеткой \*.

Многие научные и инженерные идеи Шухова, его творческий метод и сейчас близки нашей науке и способствуют техническому прогрессу.

Творческая деятельность Шухова — яркая страница в истории русской и советской науки и техники.

\* В важнейшем документе XXV съезда КПСС «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы» намечается необходимость: «Расширить практику строительства... сооружений из объемных пространственных и других прогрессивных конструкций».

В.Т. Мухомов

Избранные труды  
Строительная литература. М.: Наука,  
1977, с. 4-9.

Мухомов В.Т.