

УДК 693.972 (930)

## **Преднапряженные металлические конструкции: исторический обзор**

**Перельмутер А. В.**, д-р техн. наук

НПО SCAD Soft, Украина

**Аннотация.** Предметом рассмотрения является предварительное напряжение конструкций, то есть искусственное создание в них до начала эксплуатации внутренних усилий и напряжений для получения или увеличения необходимых полезных качеств. Концепция предварительного напряжения основана на свойстве статически неопределимых механических систем допускать в своих элементах внутренние усилия и напряжения при отсутствии внешних силовых воздействий. Основное внимание в работе уделено несущим строительным металлическим конструкциям. Проведен исторический анализ становления и развития приемов искусственного регулирования усилий в таких конструкциях. Показаны основные этапы реализации этой концепции, начиная от интуитивных решений древности до разработки эффективных технологических и конструктивных приемов нашего времени. Указаны источники зарождения основных идей в этой области и их отражение и развитие в теории сооружений. Описаны примеры их воплощения в различных известных конструктивных решениях. Наиболее представительными из них являются мосты, большепролетные покрытия, высотные сооружения и стальные листовые конструкции.

**Ключевые слова:** металлические конструкции, предварительное напряжение, вантовые системы, управление поведением.

### **1. Введение**

Проектирование конструкций обычно выполняется в предположении, что ненагруженная система не напряжена. Однако это не так. Практически для всех сооружений типичным является наличие так называемых монтажных напряжений, вызванных неточностью изготовления и сборки конструкций, термических напряжений от сварки, накапливающихся в процессе монтажа напряжениями от собственного веса и т. п. Почти все эти примеры относятся к начальным напряжениям, возникающим «сами по себе», то есть не предусмотренным специально инженерным замыслом. Проектировщику остается только принять меры к снижению этих напряжений, а также пытаться оценить их значения, чтобы не учитывать их влияние на поведение конструкции.

Но известно и обратное стремление не к ликвидации, а, наоборот, к созданию предварительного напряжения. Иногда этот прием применяется неосознанно, и сейчас множество предметов, которые нас окружают, имеют предварительное напряжение, абсолютно не замечаемое большинством из нас (бочки, стянутые обручами, спицы велосипедного колеса, струнные

музыкальные инструменты, зонтики из гибкого шелкового материала, полотна ручных пил, луки и т. д.).

Параллельно уже давно используется идея регулирования усилий в конструкциях путем создания специального контролируемого предварительного напряжения, которое является частью инженерного замысла. Применение этой идеи встречается в конструкциях из любых строительных материалов, хотя наиболее известны предварительно напряженные железобетонные конструкции [11]. Здесь целью предварительного напряжения является обжатие бетона для недопущения появления трещин в тех зонах поперечного сечения, где возможно появление растяжения.

Но преднапряжение (искусственное регулирование усилий) может давать и другие положительные эффекты. Оно может быть существенным для функциональных возможностей или стабильности конструкции, оно может улучшить ее работу, увеличивая жесткость или ограничивая разрушение. Наконец, перераспределение внутренних усилий, достигаемое за счет преднапряжения, является одним из инструментов оптимального проектирования [17].

Один из создателей промышленности преднапряженного железобетона Е. Фрейсине суммировал в предисловии к [70]: «Эта идея в основе чрезвычайно проста, даже если это не видно при ее реализации».

В истории строительства преднапряжение было применено к большинству строительных материалов, включая ткани, лес, каменную кладку, металлы и бетон. Оно использовалось и для небольших объектов, и для большепролетных конструкций. Некоторые новейшие строительные конструкции вообще не могут существовать без предварительного напряжения (например, «пневматические конструкции» из мягких тканей). При этом предварительно напряженный железобетон отнюдь не является примером первого применения преднапряжения для совершенствования строительных конструкций. Не говоря уже о древности, можно лишь отметить, что первый патент на предварительно напряженную металлическую конструкцию получен в 1826 году, а на предварительно напряженную железобетонную конструкцию – в 1886 году.

## **2. Предыстория: время интуиции**

Использование преднапряжения имеет древнюю историю, большая часть которой относится к временам, когда этот прием использовался полуинтуитивно, опираясь скорее на традицию, чем на инженерный анализ. Те немногие рассуждения о сознательном использовании технологии

преднапряжения, которые встречаются в этом периоде, имеют качественный характер, что, впрочем, ничуть не умаляет достижения древних мастеров.

Одним из первых документально зафиксированных примеров использования преднапряжения, по-видимому, может служить рисунок судна из гробницы фараона Сахора (2550 г. до н. э.). Конструкция древнеегипетских речных судов была слишком хрупкой, поэтому для их использования на море весь корпус по длине вдоль бортов обхватывали тросом. Чтобы предотвратить перегиб корпуса, в носу и корме укладывали поперечные брусья, концы которых соединяли коротким тросом, обхватывающим снаружи корпус судна. Между поперечными балками натягивали еще один трос, опирающийся на вертикальные стойки с развилкой. Трос натягивали коротким стержнем-закруткой (рис. 1). Этот преднапряженный шпренгель предотвращал общее искривление корпуса [30], [66] (такая же техника используется, чтобы натянуть лезвие в традиционной лучковой пиле). В начале XIX столетия подобные конструкции еще можно было встретить на речных судах Африки.

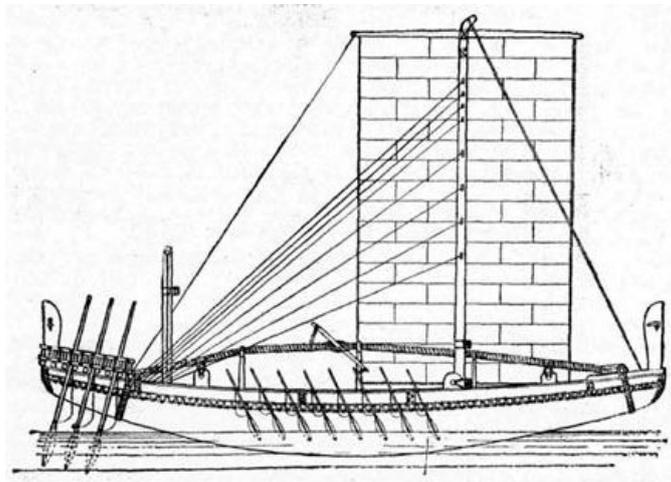


Рис. 1. Египетское судно времен Древнего царства, V династия, 2550 г. до н. э.  
Рисунок из гробницы фараона Сахора, Мемфис

Относительно небольшие растягивающие силы могут создаваться непосредственно, как это делается для растяжек палаток или при регулировании натяжения струн в музыкальных инструментах. Нагрузка преднапряжения может также быть вызвана при использовании клиньев (рис. 2), как это было предложено для того, чтобы сжать цепью купол собора св. Петра в Риме, где были обнаружены трещины в каменной кладке [2]. Другая техника преднапряжения использует натягающие гайки или талрепы на стержневых элементах конструкции. Так обычно делается на спицах обычных велосипедных колес.

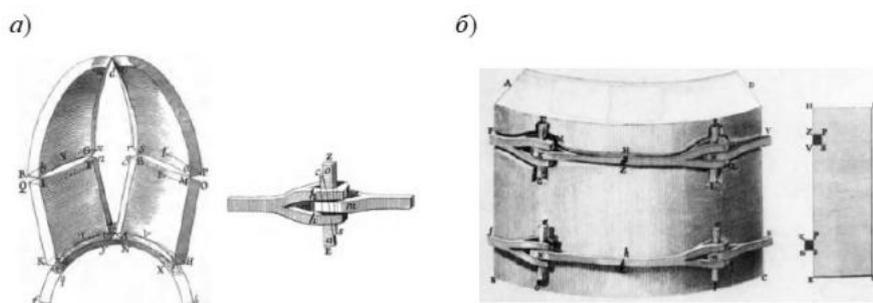


Рис. 2. Способ предотвращения разрушения купола:

*а* – расчетная модель, *б* – эксперимент Поленьи (G. Poleni) (заимствовано из [2])

Бочки и колеса относятся к наиболее древним предварительно напряженным «конструкциям» из дерева. Классическое колесо со спицами, ступицей и железным ободом люди стали использовать с начала железной эры в Европе, приблизительно 2500 лет тому назад.

В качестве примера искусственного регулирования напряжений в каменных конструкциях могут служить исторические триумфальные арки, выполненные из массивных камней. С помощью дополнительной нагрузки (балласта) были снижены нежелательные растягивающие напряжения в элементах кладки. Гейманн [52] отмечает, что вес башенок в готических соборах помог предотвратить сдвиговые отказы этих конструкций. Мы встречаем такие приемы в старых акведуках, виадуках, различных арках старинных дворцов и в других сооружениях (рис. 3).

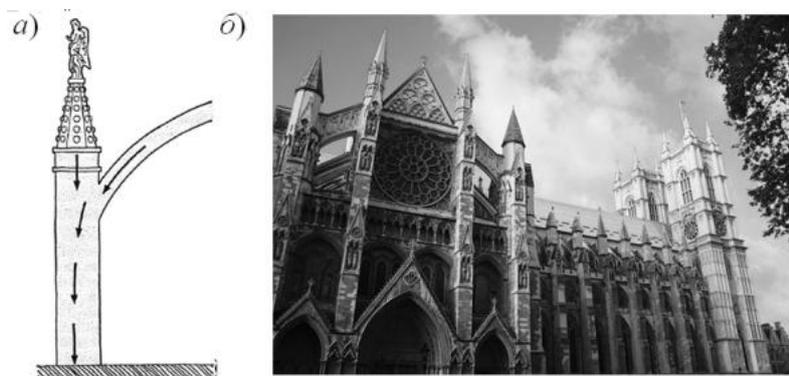


Рис. 3. Пригрузка каменной кладки: *а* – принципиальная схема, *б* – реализация на Вестминстерском соборе

### 3. Предвестники: время пионерных разработок

Дерево и камень на протяжении многих веков были основными строительными материалами, поэтому не удивительно, что среди первых примеров сознательного применения преднапряжения находятся деревянные мостовые фермы.

В августе 1829 г. Стивен Гарриман Лонг (Stephen Harriman Long) построил деревянный мост недалеко от Балтимора. Важной особенностью системы Лонга было использование клиньев, с помощью которых осуществлялось преднапряжение, а именно сжатие раскосов. Таким образом, без нагрузки обе диагонали были сжаты, в то время как оба пояса и вертикальные стержни были растянутыми (рис. 4, а).

Уильям Гау (William Howe) заменил вертикальные деревянные элементы у фермы Лонга железными прутами и получил патенты для его ферм в 1840 и в 1846 годах. Как и у Лонга, в ферме Гау деревянные диагонали были сжаты, но Гау вместо клиньев на диагоналях использовал натяжение вертикальных элементов. Мостовые фермы системы Гау (рис. 4, б) впервые были применены при строительстве моста в 1840 г. Предварительное напряжение создавалось с помощью стальных вертикальных стяжек, на концах которых затягивались гайки.

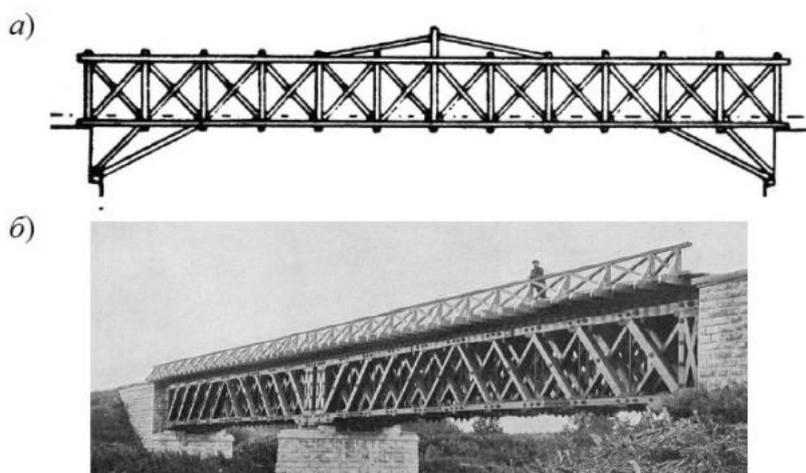


Рис. 4. Деревянные мосты с преднапряжением:  
а – мост Лонга по патенту 1830 года, б – мост системы Гау

В варианте Гау, как и в варианте Лонга, преднапряжение вводилось для того, чтобы обеспечить работу раскосов – как всегда сжатых элементов, поскольку реализовать стык раскоса с узлом, способный работать на растяжение для деревянной конструкции, было весьма затруднительно. По сути, здесь возникала та же проблема, что и в конструкции соединения спиц деревянного колеса с его ободом, которая также решалась с помощью преднапряжения. И на первых порах величина преднапряжения назначалась интуитивно, пока в 1956 году не появилось сочинение Д. И. Журавского «О мостах раскосной системы Гау», где был дан способ расчета таких систем.

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

Первыми полностью металлическими преднапряженными конструкциями мостов были чугунные пролетные строения, разработанные и построенные приблизительно в 1836–1839 годах английскими инженерами Стефенсоном (Robert Stephenson) и Биддером (George Parker Bidder). Эти конструкции имели пролет 100 футов (30,48 м) и были составлены из трех чугунных сегментов, соединенных болтами, и преднапряженные внешними стяжками из кованого железа (рис. 5).

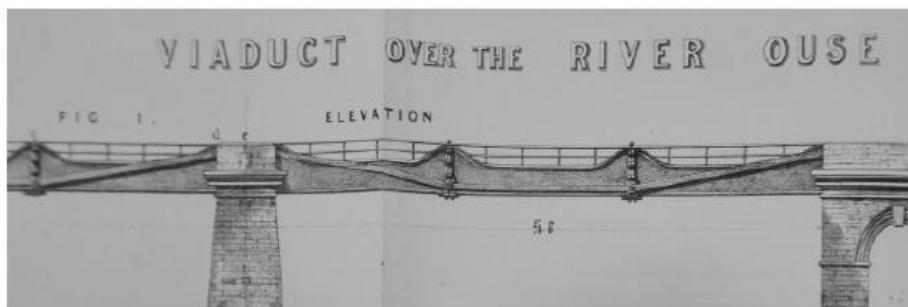


Рис. 5. Преднапряженное пролетное строение Стефенсона

Использование напрягаемых элементов, которые натягивались гайками, стало понемногу распространяться и на другие типы конструкций. В качестве примера применения напрягающих элементов можно привести покрытие центрального зала старой бирсы в Антверпене, построенной в 1856 г. (рис. 6). Эта конструкция состоит из 12 арочных стропильных ферм, горизонтальные силы в опорах арок воспринимаются круглыми затяжками с натяжными болтами.



Рис. 6. Покрытие старой бирсы в Антверпене

Гибкие элементы ферм, натянутые концевыми гайками (рис. 7) или с талрепами, становятся стандартным приемом конструирования мостовых конструкций в конце XIX века. Позже, с внедрением заклепочных соединений эта конструктивная форма перестала использоваться, чтобы возродиться примерно через 60 лет, когда пришла эра вантовых несущих конструкций.



Рис. 7. Мостовая ферма (США, 90-ые годы XIX века)

#### **4. Регулирование усилий как инженерный прием**

В 1850 году был построен знаменитый мост «Британия», открывший по сути эру стального мостостроительства [15]. Здесь впервые был применен метод регулирования усилий, основанный на принудительном деформировании конструкции в процессе ее сборки. Производством работ руководил инженер Кларк (E. Clark). В своей книге [31] он пишет о ясном понимании проблемы

необходимости выравнивания деформаций в опорных и пролетных сечениях неразрезной балки практически постоянного сечения.

Для того, чтобы осуществить это выравнивание, использовался остроумный прием сборки моста (рис. 8). Сначала укладывалась труба, перекрывающая наибольший пролет СВ. При изготовлении стыка В смежная труба АВ устанавливалась под некоторым углом к горизонту, и в этом положении осуществлялась клепка стыка. Когда секция АВ принимала горизонтальное положение, на опоре В возникал изгибающий момент, величина которого зависела от угла наклона секции АВ к горизонту. Аналогичную операцию выполняли и с секцией CD и DE.

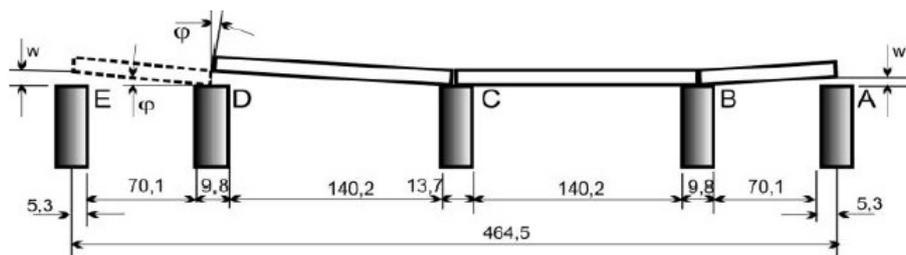


Рис. 8. Сборка моста: а – общий вид, б – схема монтажа пролетов

Примерно в те же годы чешский инженер Б. Шнирх разработал проект (рис. 9), в котором предусматривалось регулирование усилий в мостовой конструкции [41]. Это был предшественник балочно-консольной схемы мостов, в которых путем натяжения подкосов добивались выгодного перераспределения изгибающих моментов.

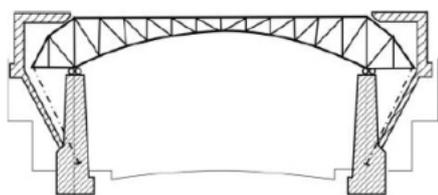


Рис. 9. Проект моста, выполненный  
Б. Шнирхом

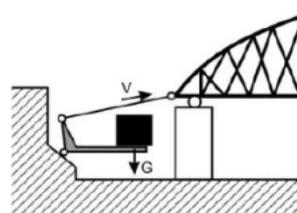


Рис. 10. Использование балластного  
груза

В 1878 году по проекту К. Кепке был построен мост через Эльбу, при проектировании которого впервые была предпринята попытка расчетным путем определить необходимое усилие преднапряжения [67]. Требовалось предварительно сжать нижний пояс усилием  $V=600$  тс, для чего использовался балластный груз весом  $G=300$  тс, который через рычажное

устройство передавал усилие нижнему поясу (рис. 10). Балластные грузы использовались также в некоторых проектах висячих мостов для регулирования усилий в канате [41].

Определение необходимого уровня преднапряжения и его реализация в конструкции, взамен «натяжения до упора», постепенно становилось стандартным приемом конструирования. Этому способствовала развитие методов расчета, хотя не всегда они использовались в целях установления необходимого уровня преднапряжения.

Своеобразным приемом, иллюстрирующим сказанное, является история создания колеса обозрения на всемирной выставке 1893 года в Чикаго, которое возводилось, чтобы превзойти башню Эйфеля, ставшую символом Парижской выставки 1889 года. Колесо имело преднапряженные спицы и являлось статически неопределимой системой. Но вместо раскрытия статической неопределимости, проектировщик колеса Джордж Феррис (J. Ferris) воспользовался тем, что распределение усилий от нагрузки является кососимметричным относительно горизонтального диаметра, а распределение усилий преднапряжения – симметричным (рис. 11). Исходя из условия, что суммарное значение усилия в вертикальной спице 1 должно быть нулем, а полное решение должно подчиняться общему условию равновесия, была решена эта задача.

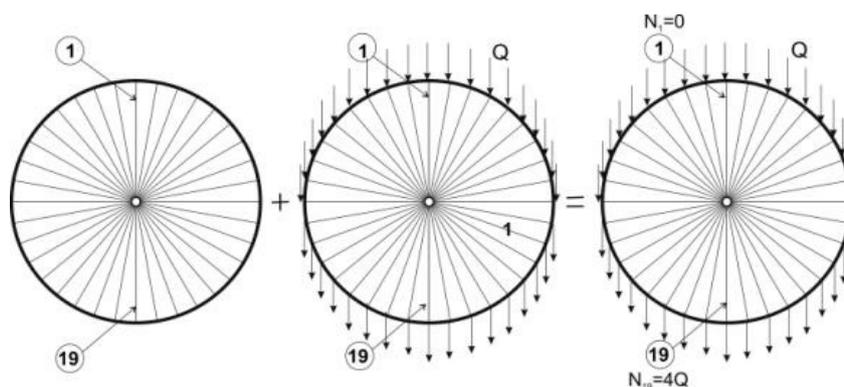


Рис. 11. К расчету колеса Ферриса

Конец XIX века ознаменовался важными достижениями в разработке преднапряженных стальных конструкций, которые осуществил В. Г. Шухов.

В 1895 году Шухов подал заявку на получение патента по сетчатым покрытиям в виде оболочек. При этом имелись в виду сетки из полосовой и уголкового стали с ромбовидными ячейками. Из них изготавливались большепролетные легкие висячие покрытия и сетчатые своды. После первых опытных построек (два сетчатых свода в 1890 г., висячее покрытие в 1894 г.)

Шухов во время Всероссийской выставки в Нижнем Новгороде в 1896 году впервые представил на суд общественности свои новые конструкции перекрытий.

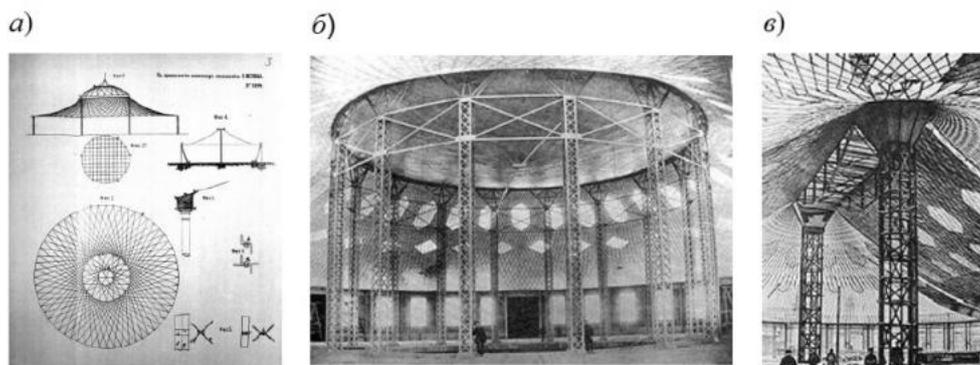


Рис. 12. Висячие покрытия системы В. Г. Шухова: а – чертеж из патента 1905 года, б, в – фотографии объектов

Можно ли считать висячие системы такого типа, постоянно действующие усилия в которых создаются собственным весом, преднапряженными конструкциями? Ведь такого типа внутренние усилия существуют в любой системе. Полагаю, что ответ на поставленный вопрос должен быть положительным по следующим соображениям. Если бы каким либо чудом собственный вес исчез, то обычные неизменяемые системы не изменили бы своего поведения, в то время как рассматриваемые висячие системы существуют и могут воспринимать нагрузку (не всякую, а лишь определенного вида) только при действии собственного веса. Поэтому следует относиться к ним, как к преднапряженным.

Разработка этих сетчатых покрытий ознаменовала собой создание совершенно нового типа несущей конструкции. Шухов впервые придал висячему покрытию законченную форму пространственной конструкции, которая была вновь использована лишь спустя десятилетия. Позже выяснилось, что большинство висячих сетчатых покрытий практически не могут работать без преднапряжения. Эти конструкции во второй половине XX века стали одним из самых характерных примеров использования преднапряжения.

В 1914 году по проекту В. Г. Шухова было построено покрытие оригинальной конструкции над магазином «Мюр и Мюрелиз» (ныне ГУМ): это были легкие арки, усиленные предварительно натянутыми струнами, которые создали шесть дополнительных опор, способных воспринимать нагрузку любого направления и заметно увеличивающие способность арок

воспринимать несимметричную нагрузку (рис. 13). Это решение было повторено и на других объектах.

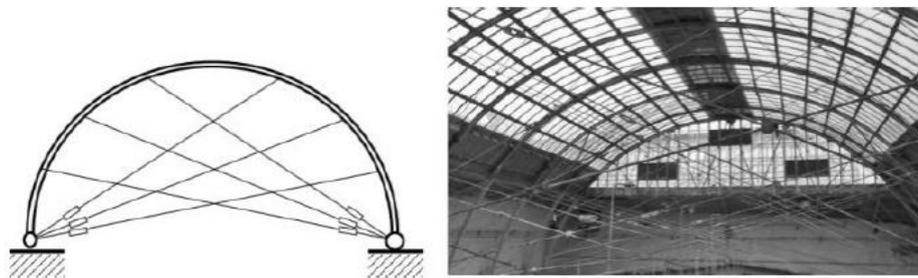


Рис. 13. Преднапряженная арочная ферма В. Г. Шухова

### **5. Появление соперника: начало эры преднапряженного бетона**

Следует отметить, что методы использования предварительного напряжения в стальных конструкциях почти не развивались в первой половине XX века. В монографии Ференчека и Тохачека [41] отмечается, что в этот период, за исключением висячих покрытий, не было создано каких-либо достойных внимания новых предварительно напряженных металлоконструкций. Их развитие отошло на задний план в связи с разработкой теории пластичности, которая предполагала естественную перегруппировку усилий в системе, однако ее возможности ограничены. Вследствие этого, а также благодаря появлению высокопрочных материалов, преднапряжение металлоконструкций начало развиваться лишь после Второй мировой войны. А пока что инженерная мысль переключилась на новый строительный материал – железобетон.

После того, как в 1824 году был изобретен портландцемент, стало возможным развитие бетонного строительства. Особенно быстро развивалась промышленность бетонных изделий. Довольно быстро встал вопрос, как избежать появления трещин в бетоне, плохо работающем на растяжение.

Первое предложение [39] – подвергать стальную арматуру натяжению – исходило от инженера Дёринга (Doehring), который в 1888 году получил немецкий патент DRP 53548. В этом предложении проволоки, помещаемые в бетон плиты, подвергаются сильному натяжению с помощью направляющих роликов и натяжных приспособлений, расположенных с обоих торцов. Впрочем, еще 27.10.1886 американец Джексон (P. H. Jackson) подал патентную заявку на изобретение, которое предусматривало увеличение жесткости и повышение долговечности конструкций из бетона. В патентной заявке было сказано, что изобретение включает комбинированные строительные конструкции, состоящие из системы сводов, опорные части

которых армированы стальными стержнями с винтовой резьбой на концах, снабженных навинчивающимися гайками. При навинчивании гаек стержни натягиваются и обжимают сводчатые конструкции.

Последовавшие за Дёрингом и Джексонем разработки и их практическое использование довольно быстро указали на серьезную проблему падения величины предварительного напряжения во времени, падения вызванного усадкой и ползучестью бетона. Магиас Коэн, получивший патент в 1888 году, устанавливал предварительное напряжение  $600 \text{ кг/см}^2$ . Усадка бетона составляет примерно  $3 \times 10^{-4}$ , а модуль упругости стали –  $2100000 \text{ кг/см}^2$ . Относительное укорочение порядка  $3 \times 10^{-4}$  снижает напряжение в стали на  $(3 \times 10^{-4}) \times (2,1 \times 10^6) = 630 \text{ кг/см}^2$  и, таким образом, предварительное напряжение исчезает.

Эжен Фрейсине в результате тщательного исследования пришел к убеждению, что потеря натяжения в арматуре вследствие ползучести и усадки бетона становится тем меньше, чем прочнее и плотнее бетон и чем выше прочность стали. Основным содержанием его изобретений следует считать то, что прямолинейная арматура из высокопрочной стали с большим пределом упругости, которая помещалась в тело бетона высокой прочности на сжатие в процессе изготовления строительной конструкции, подвергается предварительному напряжению не менее  $4000 \text{ кг/см}^2$ . Эти предложения легли в основу патента, вся суть которого относилась не к конструктивной форме, а к технологии создания предварительного напряжения в железобетоне. Этот патент зарегистрирован 2 октября 1928 года во Франции Эженом Фрейсине (Eugène Freyssinet) и Жаном Салье (Jean Séailles) [46], впоследствии, в 1929 году он был зарегистрирован в Германии.

Использование высокопрочной стали в обычных железобетонных конструкциях приводило к тому, что волосяные трещины раскрывались до недопустимых значений, и здесь изобретение Фрейсине оказало революционное воздействие. Но не только это сказалось на судьбе преднапряженных конструкций. Экономическая эффективность использования пучков высокопрочной проволоки, или стальных канатов, привлекала внимание сама по себе. А последовавшие далее многочисленные конструктивные находки для решения задачи анкеровки таких элементов оказались востребованными не только в области преднапряженного железобетона.

На первых порах речь еще не шла о предварительном напряжении больших железобетонных сооружений. И о начале идеи предварительного напряжения всего сооружения можно, по-видимому, говорить, рассматривая особый способ раскручивания арок, предложенный тем же Фрейсине. Впервые этот способ был применен при строительстве трехшарнирных арок моста

Praireal-sur-Besbre пролетом 26 м в 1907 году (рис. 14, *а*). Идея состояла в том, что в ключевом сечении арки размещались домкраты для создания горизонтальных усилий на обеих половинах арок. Результатом было предварительное сжатие и небольшое вращение обеих половин арок вокруг опорных шарниров, что снимало конструкцию с кружал. Когда домкраты были удалены, трехшарнирная арка могла обычно функционировать. Раскружаливание сводов гидравлическими домкратами дает возможность придать своду начальные усилия, создающие напряжения, обратные действующим в нем от вертикальной нагрузки, и предотвратить этим вероятность появления растягивающих напряжений.

Эта техника была настолько легка и эффективна, что это скоро стало интернационально используемым. Сам Фрейсине использовал ее в 1928–1929 годах при строительстве арочного моста Элорн в Плугастель (рис. 14, *б*), построенного с рекордным на то время пролетом 180 м.

Важным было то, что в практику вошел способ предварительного напряжения конструкции путем реализации определенной последовательности производства работ, возможно, с использованием замыкания статически неопределимой системы под нагрузкой. Эта идея имела большую ценность и далеко выходила за пределы области преднапряженного железобетона.

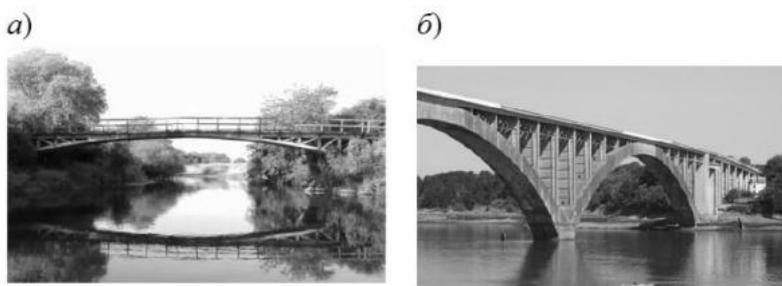


Рис. 14. Арочные мосты Фрейсине: *а* – мост Praireal-sur-Besbre,  
*б* – мост Элорн в Плугастель

Долгое время предварительно напряженный железобетон отличало то, что арматура напрягалась до заливки бетона и оставалась внутри железобетонной конструкции. Довольно быстро было замечено, что такая технология является не единственно возможной, и что натяжение арматуры можно реализовать и после твердения бетона, если позаботиться о том, чтобы не происходило сцепление арматуры с бетоном. Мысль о том, чтобы подвергать натяжению арматуру железобетонных конструкций лишь после твердения бетона, а затем его обжимать, была подхвачена в 1925–1928 гг. несколькими изобретателями, работавшими независимо друг от друга.

И следующий шаг в развитии преднапряженного железобетона состоял в том, что напрягаемая арматура оказалась вынесенной за пределы бетонного сечения. Такое предложение было запатентовано в Германии Дишингером (Dischinger) в 1928 году [33]. Его патент касается способа сооружения железобетонных арочных мостов с затяжками и висячей проезжей частью. Он относится к таким железобетонным арочным мостам, у которых дополнительные напряжения арки, вызываемые удлинением затяжки, устраняются ее предварительным натяжением. С помощью домкратов затяжка подвергается натяжению до степени расчетного максимального удлинения одновременно с раскруживанием моста. Благодаря удлинению затяжки и укорочению арки устраняются моменты от действия собственного веса. Дальнейшее влияние ползучести бетона может быть погашено в любое время путем подтягивания затяжки.

Первым сооружением, выполненным по этому запатентованному в Германии способу, был мост пролетом 68 м через р. Заале у Альслебена. Постройка этого моста привлекла в то время настолько большое внимание, что метод Дишингера через полтора года был запатентован во Франции, так как его автор не использовал своего права приоритета во Франции. После 1928 года по этому патенту в Германии был построен ряд авиационных ангаров.

Вынос напрягающих элементов конструкции за пределы напрягаемой бетонной части сооружения был идеей, также выходящей за рамки преднапряжения железобетона. Эта идея могла быть использована, а позже действительно использовалась, и при создании преднапряженных металлоконструкций. А конструктивные решения узлов передачи усилий от напрягаемых элементов другим частям сооружения во многом были общими для конструкций из различных материалов.

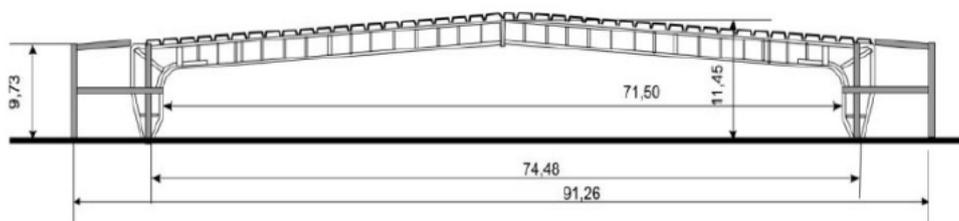


Рис. 15. Ангар с преднапряженными затяжками

Сам Дишингер, начиная с 1935 года, начал выдвигать достаточно широкие предложения по предварительному напряжению стальных конструкций. Его предложения относились к железнодорожным мостам, прогонам, коробчатым балкам, фермам и другим конструктивным формам [36, 37].

Первый раз они были реализованы в 1948 году при строительстве ангара (рис. 15), но широкое распространение получили лишь впоследствии.

## **6. Время зрелости**

В послевоенном периоде использование предварительного напряжения для железобетонных конструкций стало массовым, возродился интерес к этой технологии и у проектировщиков стальных конструкций.

Были предприняты усилия по разработке металлических конструкций (балок и ферм), усиленных напрягаемыми канатными затяжками. Эту идею развивал Г. Маньель (Gustave Magnel), который в 1950 году опубликовал результаты экспериментальных исследований стальной фермы с преднапряженным поясом [59], сыгравшие заметную роль в процессе внедрения преднапряжения металлоконструкций (рис. 16). К числу ранних публикаций относится и появившаяся в 1949 году статья В. М. Вахуркина [5], в которой рассматривались теоретические основы предварительно напряженных стальных конструкций.

Одной из первых реализованных преднапряженных конструкций ферменного типа была запроектированная Маньелем двухпролетная ферма ангара в Мельсборне (Бельгия), построенного в 1953 году [60]. Спаренные фермы пролетом 76,5 м усиливались преднапряженными затяжками. Две симметричные затяжки, каждая из двух ветвей, прокладывались от верха промежуточной опоры к серединам пролетов и далее вдоль нижнего пояса до конца пролета (рис. 16). Их натяжение разгружало фермы в пролете.

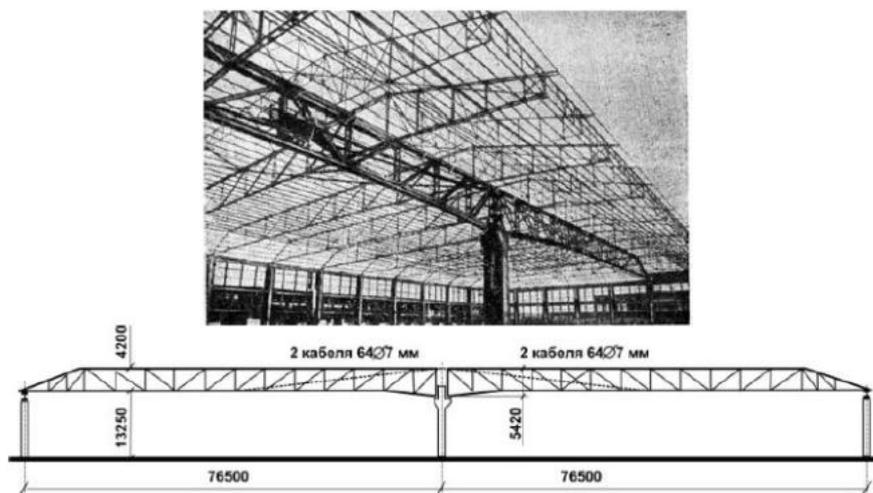


Рис. 16. Перекрытие ангара в Мельсборне

Впоследствии появились еще несколько реализованных проектных решений, например, таких, как построенное в 1959 году покрытие ангара в Чикаго, запроектированного в виде консольных ферм с вылетом 42,0 м (рис. 17). По верхнему поясу ферм уложены внахлестку 12 затяжек из высокопрочной стали с концентрацией их в месте действия наибольших усилий. Стержни затяжек диаметром 28,6 мм натягивались силой 270 кН каждый.

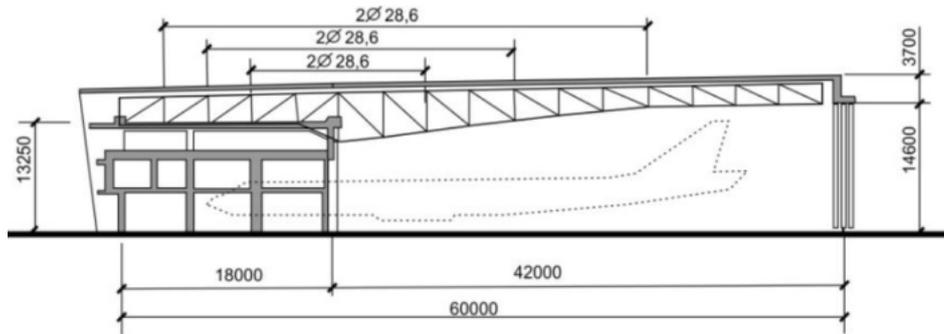


Рис. 17. Предварительно напряженные фермы ангара в Чикаго

Предпринимались неоднократные попытки использовать предварительное напряжение «обычных» металлических конструкций – ферм и балок – для массового строительства. Можно назвать несколько десятков соответствующих примеров, но они все равно остаются единичными.

При этом в практику проектирования преднапряженных стальных конструкций проникают и некоторые конструктивные находки, ранее использованные в железобетоне, например, такие, как способы анкерки натягающих стальных канатов. Однако, довольно быстро было установлено, что механический перенос приемов преднапряжения, основанных на использовании стальных канатов, не ведет к существенному эффекту в стальных конструкциях относительно небольших пролетов, экономия стали порядка 10–12 % не компенсирует увеличение трудоемкости.

Кроме того, имеется некоторое принципиальное различие в подходах. Если в железобетоне основной целью использования преднапряжения была борьба с образованием трещин, и необходимость парировать негативные эффекты привела к использованию высокопрочной арматуры, то для стальных конструкций главным было перераспределение усилий в статически неопределимой системе, которое позволяло запроектировать конструкцию более экономичным способом.

Многие удачные примеры создания преднапряжения у стальной конструкции связаны с идеей перераспределения внутренних усилий в системе за счет определенного порядка действий во время монтажа, когда в роли

«напрягающей системь» выступает собственный вес (иногда и дополнительный балласт).

Одним из первых примеров такого рода является строительство путепровода в Киеве в 1948 году. Для снижения высоты балки в пролете, что требовалось по архитектурным соображениям, повышения жесткости и экономии металла был предусмотрен специальный порядок монтажа, при котором характер работы системы изменялся по этапам. Первоначально была собрана балка на стойках (рис. 18) и бетонировалась плита на консолях. В соответствии с характером работы двухконсольной балки консоли при этом прогнулись, вызвав выгиб балки в пролете кверху.



Рис. 18. Путепровод в Киеве: *а* – общий вид, *б* – этапы производства работ

В таком положении к балке прикрепаны раскосы, соединяющие концы консолей с низом опорных стоек. После этого бетонировалась плита проезжей части в пролете, нагрузка от плиты и опалубки воспринималась уже рамной системой, что вызвало растяжение в раскосах. Величина растягивающих усилий оказалась больше величины сжимающих усилий в раскосах, возникающих при расположении временной нагрузки на консолях. Таким образом, раскосы всегда растянуты.

Идея придания балочно-консольной системе предварительных усилий путем пригрузки с последующим превращением в рамную систему принадлежит В. М. Вахуркину, получившему на нее авторское свидетельство [3] в 1949 году. Она оказалась очень плодотворной, и с ее помощью удалось соорудить ряд мостов с большими пролетами при экономичной затрате материала, высокой жесткости и благоприятных очертаниях (В. М. Вахуркин, Г. Д. Попов).

Искусственное регулирование усилий путем определенной последовательности монтажа применялось и ранее в балках жесткости висячих мостов. Одним из первых можно назвать Крымский мост в Москве, где во время монтажа были использованы временные шарниры,

установленные в середине среднего пролета и в крайних пролетах на расстоянии 10,5 м от промежуточных опор (рис. 19). Но управление последовательностью монтажных операций, как эффективный прием вмешательства в игру сил, инженеры осознали во второй половине XX века.

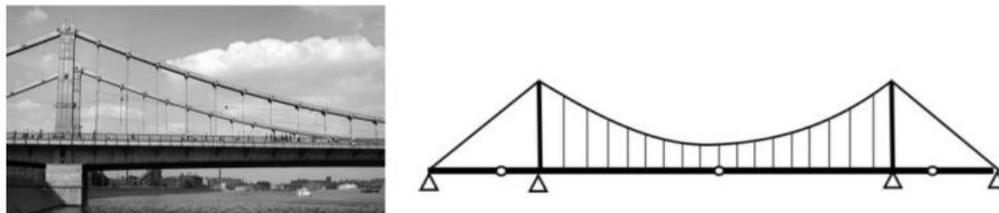


Рис. 19. Устройство временных шарниров

В эти же годы на арену вышли преднапряженные вантовые стальные мосты, которые стали популярными, начиная с пятидесятих годов XX века. Большинство из них были построены в Германии, особенно через Рейн и Эльбу, чтобы заменить мосты, которые были разрушены во время Второй мировой войны и улучшить транспортную систему.

Но началось все в Швеции. В 1955 году фирмой Demag по проекту Дишингера (Dischinger) был построен первый современный вантовый мост (Strömsund Bridge) длиной 332 м с главным пролетом 182 м (рис. 20). Этим была нарушена многолетняя традиция строительства висячих мостов, беспредельно властвовавших в этой области мостостроения после ряда аварий, случившихся с вантовыми мостами первого поколения в XIX веке [9]. Этот неудачный опыт был связан с тем, что инженеры еще не умели хорошо предсказывать поведение таких конструкций под нагрузкой и правильно регулировать усилия. По сути, предварительное напряжение вант создавалось «на глаз», исходя из соображений о ликвидации заметного провисания.



Рис. 20. Мост Strömsund Bridge

Сразу после Strömsund Bridge был построен Северный мост в Дюссельдорфе (1957 г.), а затем целый ряд других вантовых мостов. За 20 лет было построено более 60 таких мостов, среди них был самый протяженный преднапряженный мост в мире – Lake Maracaibo Bridge в Венесуэле (1962 г.) со 135 пролетами и общей длиной 8,7 км (рис. 21).



Рис. 21. Самый протяженный преднапряженный мост

Эра вантовых мостов продолжается и до сегодняшнего дня. Лишь совсем недавно был построен вантовый мост на остров Русский во Владивостоке с рекордным пролетом 1104 м.

### **7. Вантовая революция**

Первая половина пятидесятых годов характеризуется взрывным развитием преднапряженных вантовых систем. Из области мостостроения эти конструкции перешли в область большепролетных покрытий над зданиями.

В 1953 году было построено вантовое покрытие над общественным зданием в г. Утика. Покрытие над круглым в плане помещением диаметром 75 м образовано системой радиально расположенных вантовых ферм с несущим верхним и натягающим нижним поясами, соединенными друг с другом распорками (рис. 22). Предварительное напряжение системы обеспечивает отсутствие сжатия в поясах вантовых ферм.

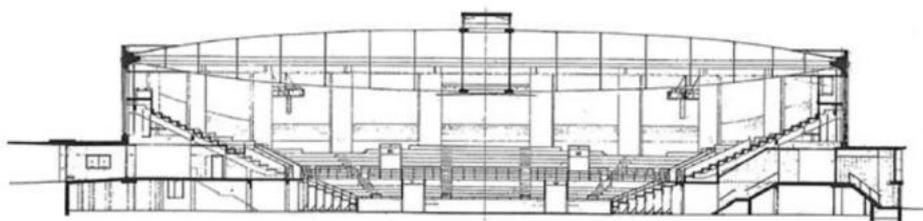


Рис 22. Покрытие аудитории в г. Утика

Проект этой первой в мире большепролетной системы, основанный на использовании вантовых ферм, был разработан Львом Цетлиным (Lev Zetlin) и стал предшественником многих других аналогичных инженерных решений. Сам Цетлин продолжал работать над совершенствованием конструкции и в 1974 году получил патент на «Безбалочное покрытие» [69], в котором использовалась многоступенчатая система преднапрягаемых вантовых ферм (рис. 23).

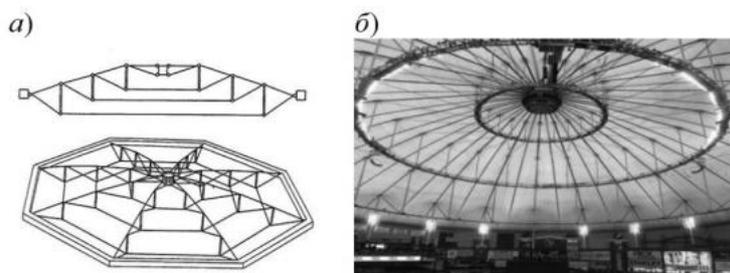


Рис. 23. Система Цетлина: *а* – принципиальная схема, *б* – реализация (купол «Тропикана»)

Начиная с 1960 года, двояковыпуклая вантовая ферма, использованная Цетлиным, стала вытесняться предварительно напряженной двояковогнутой решетчатой вантовой фермой Яверта [53], состоявшей из обращенных друг к другу канатных поясов, между которыми расположена решетка. Предварительное напряжение создается при стягивании обоих поясов диагоналями, а иногда путем натягивания поясов.

Эта конструкция впервые была применена при строительстве ледового стадиона «Юханнесхоф» в Стокгольме (авторы: Яверт, Хедквист). Размер покрытия  $83 \times 118$  м. Фермы изготовлены из предварительно вытянутых закрытых стальных тросов с прядями из холоднотянутой проволоки прочностью 140–160 кгс/кв. мм. Диаметр несущего троса 58 мм, стабилизирующего – 48 мм. Усилия распора в тросах покрытия воспринимают оттяжки из круглой стали диаметром 26 мм с условным пределом текучести 80 кгс/кв. мм, каждая оттяжка – из 12 стержней. Оттяжки закреплены в грунте железобетонными анкерами. По тросовым фермам уложены прямоугольные рамы из гнутых стальных профилей, к которым прикреплены волнистые стальные листы, а на них наклеены пропитанные асфальтом древесноволокнистые плиты с трехслойным рулонным ковром. Эту конструкцию можно считать примером тщательной проработки всех деталей, необходимой для компенсации деформаций покрытия.

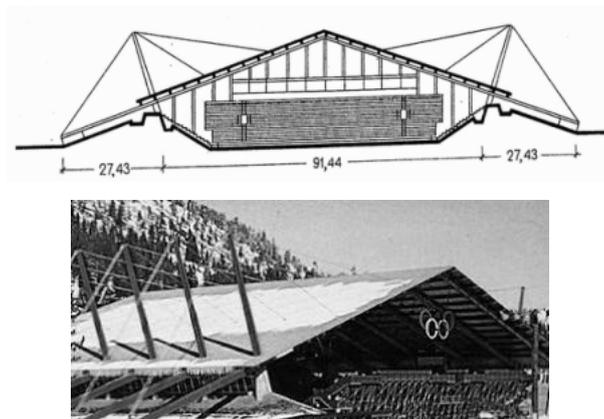


Рис. 24. Ледовый каток в Скво-Велли

В 1960 году появился еще один знаковый объект. Покрытие над крытым ледовым катком с вынесенными над его поверхностью несущими вантами было построено к зимним олимпийским играм в Скво-Велли (рис. 24). Здесь, по-видимому, впервые была применена расположенная над покрытием несущая вантовая система по типу вантовых мостов. Наклонные балки, работающие на сжатие с изгибом, имели коробчатое сечение переменной высоты, наклонные стойки-пилоны также имели переменное поперечное сечение [63]. Затем этот прием неоднократно повторялся в других сооружениях.



Рис. 25. Покрытие стадиона в г. Релей

В 1950 году архитектор Новицкий впервые разработал покрытие в виде ортогональной вантовой сети, и в 1952 году по его проекту, выполненному совместно с инженером Вильямом Дитрихом, было построено покрытие спортзала в г. Релей, давшее старт строительству вантовых сетей с несущими и натягивающими тросами, расположенными в седлообразной поверхности (рис. 25). Покрытие размером 95×97 м, образовано двумя наклонными

железобетонними арками, создающими опорный контур несущей вантовой сети. Эта сеть состоит из тросов, установленных с шагом 1,8 м, несущие тросы имеют положительную кривизну, натягающие – отрицательную, обе системы канатов предварительно напряжены.

Конструкция Релей-Арены на многие годы стала примером и вдохновляющим фактором для разработчиков новых схем преднапряженных сетчатых покрытий. На всемирной выставке 1958 года в Брюсселе тысячи сетчатые покрытия имели павильон Европы с размерами овала  $90 \times 35$  м и павильон Ватикана с размерами овала  $47,7 \times 24,5$  м. Вообще, эта выставка продемонстрировала наступление эры большепролетных висячих покрытий. Кроме упомянутых, такие покрытия имели павильоны США (конструкция Цетлина диаметром 104 м), Советского Союза (система с вантами, вынесенными над кровлей), павильон «Мари-Тюма» (тентовая оболочка по поверхности гипара).

Архитектор Кэндзо Тангэ совместно с инженером Ёсикацу Цубои продемонстрировали блестящее развитие идеи Релей-Арены в сооружениях олимпийского стадиона в Токио, построенных в 1964 году (рис. 26, а). Для главного Олимпийского стадиона было сооружено покрытие, которое стало для своего времени самым большим в мире. Его вантовые конструкции опираются на 130-метровый мост. По обе стороны моста, выполняющего функции «хребта» постройки, натянуты металлические тросы, к которым крепятся стальные панели. Мост, в свою очередь, также образован двумя мощными тросами, подвешенными к высоко поднимающимся пилонам.

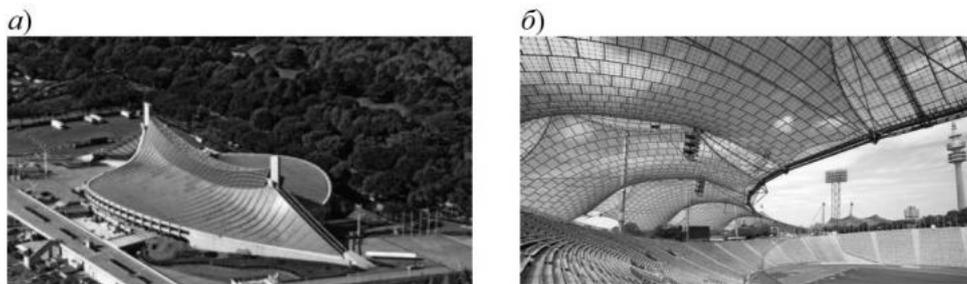


Рис. 26. Рекордные вантовые покрытия олимпийских стадионов: а – в Токио, б – в Мюнхене

Отто Фрей, написавший первую книгу о висячих покрытиях [45], довел в 1972 году идею преднапряженной сети до совершенства в его знаменитом покрытии над трибунами олимпийского стадиона в Мюнхене (рис. 26, б).

Относительно вантовой фермы Яверта следует заметить, что для висячих мостов использование решетки вместо вертикальных подвесок предложено еще в 1940 году Я. А. Осташевским [13]. Применительно к мостам на реках

с низкими берегами схема Яверта была модифицирована в 1952 году Г.Д. Поповым, который предложил сделать нижний пояс горизонтальным. Такой вариант фермы был использован в проекте вантового перехода пролетом 874 м через Волгу, предназначенного для поддержки канатных дорог при строительстве Волжской ГЭС [18]. В поперечном сечении располагались 4 фермы и 4 нитки канатной дороги, пропускная способность которой составляла 20000 м<sup>3</sup> бетона в сутки (рис. 27, а).

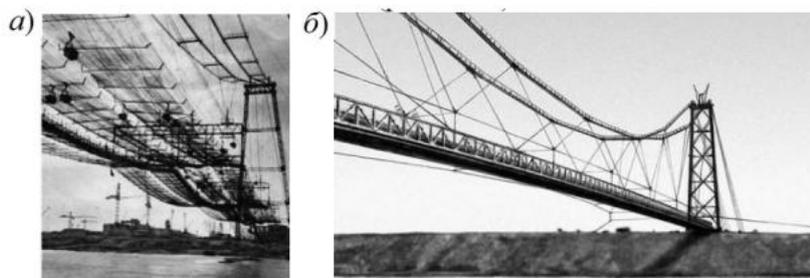


Рис. 27. Вантовые переходы через Волгу и Амударью

Для канатной дороги не требовалось устройства жесткого подвесного пролетного строения, и ее конструкция была прикреплена непосредственно к узлам нижнего пояса фермы Попова-Яверта. Для тех случаев, когда необходимо пролетное строение, Э. Я Слоним [22] предложил подвешивать его к нижнему канатному поясу (рис. 27, б). Эта схема была использована при сооружении переходов через Амударью на линии газопровода Бухара-Урал (пролет 390 м) и на границе с Афганистаном (пролет 988 м), а также перехода аммиакопровода Гольятти–Одесса через Днепр (пролет 720 м).

Примерно в это же время реализовывался проект моста в Эль-Сальвадоре вблизи Сан-Маркоса, разработка которого началась в компании Roebling & Sons еще в 1948 году, а строительство завершено в 1952 году [50].

У моста, показанного на рис. 28, было пять пролетов, наибольший из них равен 204 м. На канатах через систему непрерывно запасованной решетки была подвешена конструкция проезжей части, жесткость которой была сравнительно не велика. Вантовая система имела нижний натягаемый пояс, скрепление которого с решеткой осуществлялось лишь после загрузки моста полной постоянной и одной третью временной нагрузки, причем одновременно выполнялось его предварительное напряжение и анкеровка. Бетонная проезжая часть была сконструирована таким образом, чтобы не мешать скольжению по стальному натягаемому нижнему поясу. К сожалению, этот оригинальный мост был разрушен партизанами в октябре 1981 года.

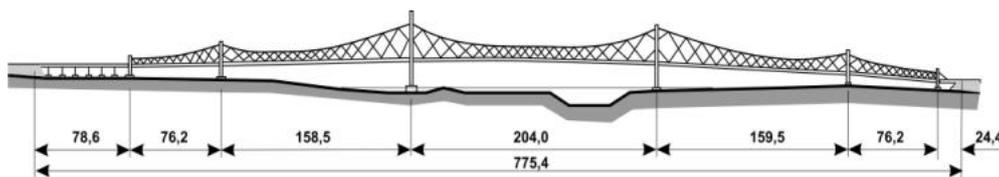


Рис. 28. Мост у Сан-Маркоса

## 8. Преднапряженные высотные конструкции

Еще одним типом конструкций, где использовались предварительно напрягаемые вантовые элементы, являются мачты на оттяжках. Их интенсивное строительство, начавшееся в начале XX века, связано с развитием радиотехники, хотя само конструктивное решение первоначально было отработано в системе стоячего такелажа парусных судов (рис. 29), где оно использовалось еще с древних времен (см. рис. 1).

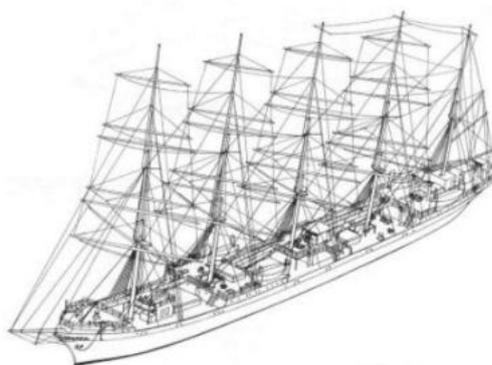


Рис. 29. Стоячий такелаж большого парусника

В конструкциях мачт предварительное напряжение оттяжек первоначально было интуитивным – попросту, следовало «выбрать слабинку» оттяжек. Это можно было себе позволить, пока такие сооружения имели относительно небольшую высоту, но с ее ростом к проблеме преднапряжения оттяжек пришлось обратиться с большим вниманием [21, 23, 24].

Для обеспечения необходимой жесткости ствола и улучшения вибростойкости таких оттяжек была предложена система с рейями, которые уменьшали провисание оттяжек. Использование рей резко уменьшает «геометрическую составляющую» удлинения ванты (удлинение за счет распрямления), что приближает работу гибкой нити к работе простого растянутого стержня и позволяет таким способом обеспечить необходимую жесткость оттяжечных опор ствола, даже при больших углах наклона оттяжек к горизонту.

Необходимость создания больших радиотехнических отражающих поверхностей привела к идее устройства мачтовой системы, в которой отражающая сетка (рефлектор) используется в качестве элемента, объединяющего опоры, в то время как усилия в перпендикулярном направлении опоры раскрепляются обычными оттяжками.



Рис. 30. Мачта с ряями

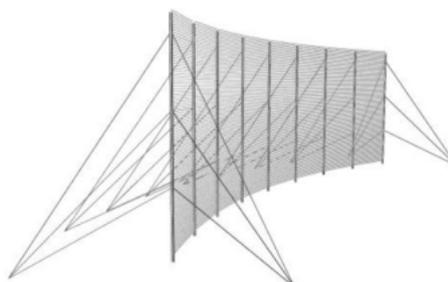


Рис. 31. Отражающая поверхность

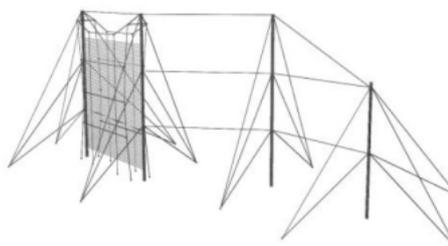


Рис. 32. Система мачт для подвески антенн СГД-РА  
(антенна условно показана только в одном пролете)

Такого рода система была создана в 1948–1952 гг. по проекту ЦНИИпроектстальконструкции для реализации идеи коротковолновой передающей радиосистемы. Для создания радиотехнической отражающей поверхности, состоящей из часто расположенных горизонтальных нитей, образующих в плане вписанную в параболу складчатую поверхность (рис. 31).

Впоследствии мачтовые системы с рефлектором широко использовались для подвески антенн СГД-РА. Они имели при этом ломаную форму в плане и не обязательно мачты одинаковой высоты (рис. 32). Создание предварительного напряжения в оттяжках и элементах проволочного рефлектора стало одной из основных проблем расчетного анализа упомянутых вантово-стержневых конструкций [14].

Не только оттяжки мачт, но и элементы других высотных сооружений были использованы в конструктивной схеме, в качестве напрягаемых. Здесь в первую очередь следует указать на предварительно напряженные раскосы радиобашен, предложенные А. Г. Соколовым. Их строительство началось еще в 1944 году, а в первых башнях раскосы выполнялись из круглой стали и не имели муфт для их предварительного натяжения. Для его реализации отверстия для болтов в концевых фасонках раскосов делались с учетом того, что одно из них могло использоваться для натяжения с помощью колков. Позже в связи с увеличением нагрузок от антенн радиорелейной связи конструктивные решения усложнились, и раскосы стали снабжать соответствующими натяжными устройствами (рис. 33).



Рис. 33. Узел башни



Рис. 34. Шпренгельная мачта

Несколько позже, уже с начала шестидесятых годов, получили распространение легкие мачты конструкции А. А. Воеводина [6] со стволом, усиленным преднапряженной шпренгельной системой (рис. 34). Отдельные ярусы ствола между оттяжками состоят из трубы, укрепленной четырьмя шпренгелями из высокопрочной проволоки. Шпренгельные тяжи имеют предварительное натяжение, благодаря чему воспринимают сжимающие усилия при работе на общий изгиб ствола от действия ветровых нагрузок и в момент потери устойчивости.

Широкое применение нашли опоры ЛЭП, раскрепленные предварительно напряженными оттяжками. Первые предложения конструкций такого типа обсуждались еще в тридцатых годах XX века, но вошли в практику при сооружении линии электропередачи сверхвысокого напряжения 400 кВт и 500 кВт в конце пятидесятих годов, когда стали применяться порталные опоры на оттяжках. Позднее появились также промежуточные опоры

на оттяжках типа «набла» с очень компактным фундаментом, такие опоры применялись на линиях 500–750 кВт и на ЛЭП 1150 кВт.

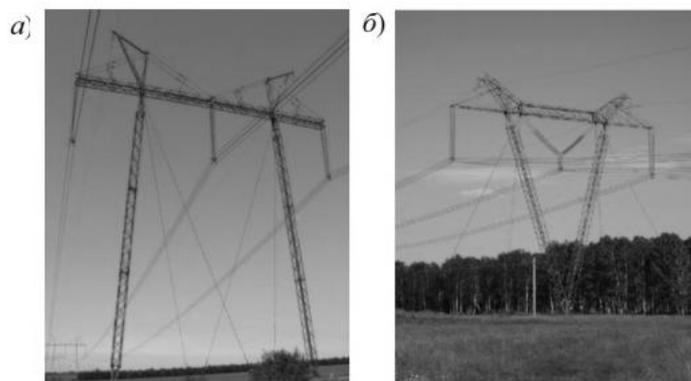


Рис. 35. Опоры ЛЭП на оттяжках:  
*а* – порталная, *б* – типа «набла»

Успешное использование вантовых систем в мостостроении, высотном строительстве и в конструкциях большепролетных покрытий инициировало попытки переноса накопленного опыта и на конструкции другого типа. В качестве примера можно указать на построенную в 1974 году в Германии близ Дортмунда (Шмехаузен) вантовую градирню высотой 146 м с диаметром 141 м в основании и 92 м наверху (рис. 36).

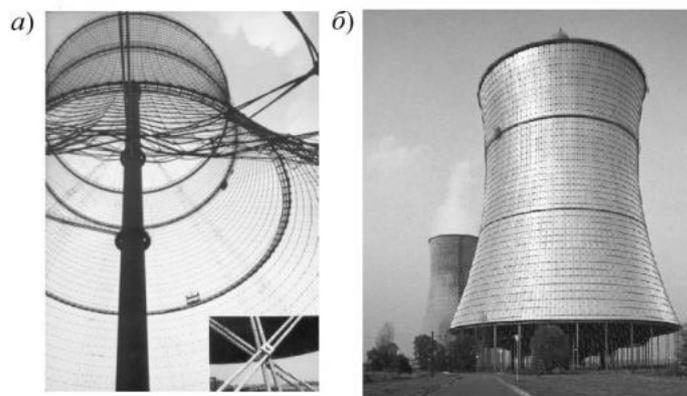


Рис. 36. Вантовая градирня атомной электростанции «Энтроп»:  
*а* – несущая вантовая сеть, *б* – общий вид завершенной конструкции

Несущей конструкцией являлась вантовая сеть, запроектированная, в отличие от обычных сетей, не с четырехугольной, а с треугольной ячейкой [40].

В центре градирни размещался пилон, к которому было подвешено верхнее кольцо. Толщина рифленого алюминия, покрывающего сеть, составляла один миллиметр. Преднапряжение вантовой сети было обеспечено за счет высокой точности изготовления канатных элементов.

В те же годы были построены две вантовые градирни высотой 53,6 м на ТЭЦ-2 в г. Волжском [8]. В этих градирнях нижнее кольцо было подвешено к вантовой сети и своим весом создавало преднапряжение.

### **9. Предварительно напряженные листовые конструкции**

Круглые резервуары из напряженно армированного железобетона для хранения воды, сточных продуктов, нефти, бензина и других жидкостей начали с успехом применять прежде всего в США [38]. Еще в 1922 году У.Х. Хьюэтт предложил исключить растягивающие напряжения в круглых резервуарах при помощи натянутых проволок [51]. А уже с 1936 года фирма «Preload Corp.» в Нью-Йорке широко применяла разработанные ею приспособления и оборудование для напряженного армирования цилиндрических резервуаров, труб и т.п. Использовалось специальное устройство, состоящее из барабана с натягиваемой проволокой, смонтированного на вагонетке, двигающейся вокруг резервуара.

Позже этот метод был перенесен на конструкции стальных резервуаров [1, 2], где обмотка стальной преднапряженной проволокой, которую размещали на нижних поясах стенки вертикального цилиндрического резервуара, дала возможность использовать здесь стальные листы, толщина которых допускает рулонирование. Эти листы после разворачивания резервуара усиливаются преднапряженной обмоткой, и таким способом была получена двуслойная конструкция, у которой имелся слой (обмотка) из высокопрочной стали.

Недостатком такого способа является необходимость использования специального оборудования, что усложняет процесс возведения резервуара, а также низкий уровень критических напряжений, потери устойчивости оболочки от внешней нагрузки, что существенно снижает величину предварительного напряжения и эффективность использования высокопрочных материалов в обмотке.

Для снижения трудоемкости возведения и повышения ее устойчивости предложено монтировать с зазором относительно оболочки горизонтальные кольцевые подкрепления в форме достаточно жестких ребер. А предварительное напряжение осуществляют за счет создания в оболочке предварительного растяжения (например, наливом жидкости) и приварки в этом состоянии кольцевых ребер, после чего предварительное растяжение с оболочки снимают (рис. 37). При нагружении резервуара эксплуатационной

нагрузкой напряжения в нем возрастают. В оребрении же вначале происходит погашение напряжений сжатия до нуля с последующим возникновением напряжений растяжения, в результате область упругой работы стенки резервуара увеличивается, что приводит к повышению общей устойчивости резервуара при воздействии вакуума или ветровой нагрузки.

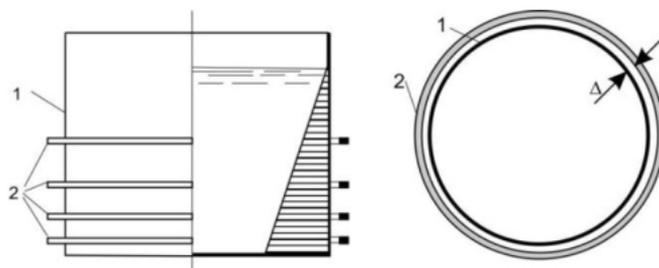


Рис. 37. Предварительно напряженный стальной резервуар:  
1 – стенка резервуара; 2 – наружное горизонтальное кольцевое оребрение;  $\Delta$  – зазор

Сама идея многослойного высокопрочного сосуда не нова. Артиллеристы с давних времен разработали теорию многослойных стволов для орудий крупного калибра. Еще в 1861 году А. Ф. Гадолин предложил применять предварительное напряжение при изготовлении орудийных стволов путем навивки на ствол нагретой высокопрочной проволоки. В США при производстве стволов предварительное напряжение достигалось при насадке нескольких труб друг на друга. Позже завод акционерного общества «Смит» (США) выпустил первые многослойные сосуды для химии с концентрически расположенными слоями. «Смитовские скорлупки» (полуцилиндры) надевали сверху на тонкую трубу и сваривали. Затем еще пару «скорлупок» чуть большего размера, потом следующую, и так до нужной толщины. Эта технология изготовления сосудов высокого давления нашла довольно широкое распространение, но позже она была вытеснена преднапряженными спирально навитыми конструкциями.

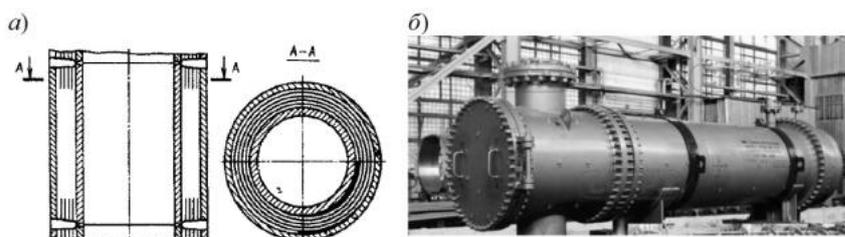


Рис. 38. Спирально-навитой сосуд высокого давления:  
а – конструктивное решение, б – готовое изделие

Он имеет корпус из одной или нескольких многослойных рулонированных секций, сваренных между собой и приваренных к концевым элементам корпуса кольцевыми сварными швами. Секция имеет центральную обечайку и закрепленную на ней клиновую вставку. К этой вставке приваривается рулонная полоса, наматываемая с натяжением по спирали Архимеда до необходимой толщины стенки, и ленту приваривают к намотанной части. Поверх рулона надевается наружный кожух.

Эта технология была улучшена за счет того, что в процессе навивки стальную ленту нагревают, повышая постепенно в процессе навивки температуру нагрева. После окончания навивки и закрепления свободного конца полосы к наружному слою сосуд охлаждают до нормальной температуры. При этом в стенке сосуда возникают напряжения, оптимально распределенные по слоям, и при последующем нагружении сосуда рабочим давлением слои оказываются нагруженными равномерно.

### **Литература**

- [1] Беленя Е. И. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции / Е. И. Беленя. — М. : Стройиздат, 1975. — 416 с.
- [2] Беленя Е. И. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции / Е. И. Беленя, С. М. Астряб, Э. Б. Рамазанов. — М. : Стройиздат, 1979. — 193 с.
- [3] А. с. 74590 СССР МПК: E01D 19/00, E01D 1/00 Консольная конструкция / В. М. Вахуркин (СССР). — № 3890 (356980) ; заявл. 12.06.1947 ; опубл. 29.02.1949.
- [4] Вахуркин В. М. Предварительно напряженные стальные конструкции / В. М. Вахуркин // Материалы по стальным конструкциям. — М. : Проектстальконструкция, 1958. — Вып. 2. — С. 66—100.
- [5] Вахуркин В. М. Предварительное напряжение элементов стальных конструкций / В. М. Вахуркин // Бюллетень строительной техники. — 1949. — № 18.
- [6] Воеводин А. А. Шпренгельные радиомачты / А. А. Воеводин. — М. : Радио и связь, 1981. — 175 с.
- [7] Гайдаров Ю. В. Предварительно напряженные стальные конструкции в промышленном строительстве / Ю. В. Гайдаров. — М. : Госстройиздат, 1960. — 86 с.
- [8] Джурицкий М. Б. Проектирование и строительство вантовой башенной градирни на Волжской ТЭЦ-2 / [Джурицкий М. Б., Фридкин В. М., Метс М. О. и др.] // Энергетическое строительство. — 1989. — № 11. — С. 25—29.
- [9] Корнеев М. М. Стальные мосты : теоретическое и практическое пособие по проектированию / М. М. Корнеев. — К. : 2003. — 547 с.

- [10] Лашенко М. Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях / М. Н. Лашенко. — М-Л. : Стройиздат, 1966. — 192 с.
- [11] Мёлль Г. Предварительно напряженный железобетон / Г. Мёлль — М. : Госстройиздат, 1958 — 306 с.
- [12] Hewett W H., United States Patent № 1818254 // ACJ-Journal, 1923 — P. 41.
- [13] Осташевский Я. А. Висячие системы с косыми подвесками / Я. А. Осташевский // Труды Ленинградского института инженеров коммунального строительства — 1940. — Вып. VII.
- [14] Перельмутер А. В. Основы расчета вангово-стержневых систем / А.В. Перельмутер. — М. : Стройиздат, 1969. — 190 с.
- [15] Перельмутер А. В. Очерки по истории металлических конструкций / А.В. Перельмутер. — М. : Издательство СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ, 2015.— 256 с.]
- [16] Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций / А.В. Перельмутер. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011.— 184 с.
- [17] Пермяков В. А. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций / В. А. Пермяков, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко.— К. : Изд-во «Сталь», 2008.— 538 с.
- [18] Попов Г. Д. Вантовый переход через Волгу / Г. Д. Попов // Строительная промышленность. — 1955. — № 12.
- [19] Попов Г. Д. Конструкции с предварительно напряженными обшивками / Г. Д. Попов // III Международная конференция по предварительно напряженным металлическим конструкциям. — М. : 1971.
- [20] Рабинович И. М. Мгновенно-жесткие системы: их свойства и основы расчета / И. М. Рабинович // Висячие покрытия. — М. : Стройиздат, 1962. — С. 76—91.
- [21] Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт / Г. А. Савицкий. — М. Связьиздат, 1953.— 275 с.
- [22] Слоним Э. Я. Особенность расчета висячих однопролетных вантовых ферм / Э. Я. Слоним // Материалы по металлическим конструкциям. — М. : Госстройиздат, 1966. — Вып. 11. — С. 100—142.
- [23] Соколов А. Г. Выбор оптимального решения телевизионных опор большой высоты / А. Г. Соколов // Материалы по стальным конструкциям, Сборник 1.— М. : 1957.
- [24] Соколов А. Г. Об определении оптимального угла наклона оттяжек в мачтах / А. Г. Соколов // Материалы по стальным конструкциям, Сборник 4. — М. : 1959. — С. 58—84.
- [25] Толмачев К. Х. Регулирование напряжений в металлических пролетных строениях мостов / К. Х. Толмачев. — М. : Автотранспорт, 1965.

- [26] Benvenuto E. An introduction to the history of structural mechanics : Vol. 1. Statics and resistance of solids : Vol. 2. Vaulted structures and elastic systems / E. Benvenuto. — New York : Springer, 1991. — 554 p.
- [27] Birdsall B. Cable-stiffened suspension bridge updated / B. Birdsall // Engineering News-Record. — 1953, May 21. — P. 32—39.
- [28] Blumfield C. V. The combination of shells and prestressing // Symposium on concrete shell roof construction — London: Cement and Concrete Association, 1952.
- [29] Calladine C. Buckminster Fuller's 'tensegrity' structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames / C. Calladine // International Journal of Solids and Structures. — 1978. — Vol. 14. — P. 161—172.
- [30] Casson L. Ships and seamanship in the ancient world — Princeton: Princeton University Press, 1971
- [31] Clark E. The Britannian and Conwaj tubular bridges : 2 volumes / E. Clark. — London : 1850.
- [32] Connelly R. The rigidity of certain cable frameworks and the second order rigidity of arbitrarily triangulated convex surfaces / R. Connelly // Advances in Mathematics. — 1980. — Vol. 37. — P. 272–299.
- [33] Dischinger F. Deutsches Reich Patent № 535440, 1928.
- [34] Dischinger F. Deutsches Reich Patent № 727429, 1934.
- [35] Dischinger F. Eingespannte Bogenbruecken mit statisch bestimmtem Horizontalschub / F. Dischinger // Beton und Eisen. — 1941. — № 40, 1/2 und 3.
- [36] Dischinger F. Stahlbruecken im Verbund mit Stahlbeton Druckplatten bei gleichzeitiger Vorspannung durch hochwertige Seile // Der Bauingenieur. — 1949. — Vol. 24, No. 11, 12 — P. 321—332, 364—376.
- [37] Dischinger F. Prestressed structural steel / F. Dischinger. — Berlin : Technical University of Berlin, 1979 — P. 60—73.
- [38] Dobell C. Design, construction and uses of prestressed concrete tanks / C. Dobell. — NY : Public Works, 1949.
- [39] Doehring C.F.W. Deutsches Reich Patent № 53548, 1888.
- [40] Erdmann W. Experiences with the first dry cooling tower for the THTR power plant at Schmehausen, FRG/ W. Erdmann // Engineering Structures. — 1990. — Vol. 12, Issue 3. — P. 146—152.
- [41] Ференчек П. Предварительно напряженные стальные конструкции / П. Ференчек, М.Тохачек. — М. : Стройиздат, 1979. — 423 с.
- [42] Finsterwalder U. Dywidag-Spannbeton / U. Finsterwalder // Der Bauingenieur. — 1952. — Heft 5. — S. 141—158.
- [43] Finsterwalder U. Eisenbetonträger mit selbsttätiger Vorspannung / U. Finsterwalder // Der Bauingenieur. — 1938. — Heft 35/36.

- [44] Finsterwalder U. Eisenbetontrager mit Vorspannung durch Wirkung des Eigengewichtes / U. Finsterwalder // Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure. — 1938. — Band 82, Heft 45. — S. 1301—1304.
- [45] Frei Otto. Das hängende Dach / Otto Frei. — Berlin : Bauwelt-Verlag, 1954 — 160 S.
- [46] Freyssinet E., Seailles J. Procédé de fabrication de pièces en béton armé — Breveet d'Invention №680 547, 1928
- [47] Fuller R. B. Tensile-integrity structures. — United States Patent 3063521, 1962.
- [48] Gasparini D. Prestressing of 19-th century wood and iron truss bridges in the US / D. Gasparini, F. da Porto // Proceedings of the First International Congress on Construction History, January, 2003 — Madrid : Instituto Juan de Herrera, 2003. — P. 977—986.
- [49] Gasparini D. Geometrically nonlinear static behavior of cable structures / D. Gasparini, V. Gautam // Journal of Structural Engineering. — 2002. — Vol. 128, No. 10. — P. 1317—1329.
- [50] Hess H. Kabelfachwerkbrücke über den Lampe River in El Salvador / H. Hess // Stahlbau. — 1953. — Heft 12.
- [51] Hewett W.H. US Patent 1818254 (10.9.27) ACJ Journal, 1923 — S. 41.
- [52] Heyman J. The stone skeleton / J. Heyman. — Cambridge : Cambridge University Press, 1995.
- [53] Jawerth D. Vorgespannte Hängekonstruktion als gegensinnig gekrümmten Seilen mit Diagonalverspannung / D. Jawerth // Der Stahlbau. — 1959. — № 5.
- [54] Kalousek M. Ocelový obloukový most rozpětí 216,0 m předpjatý tlakem lisu ve vecholu / M. Kalousek // Inz Stavby. — 1957. — Heft 11.
- [55] Kuznetsov E. N. Underconstrained Structural Systems / E. N. Kuznetsov. — New York : Springer Verlag, 1991. — 312 p.
- [56] Lämmlein A. Spannbetonbrücke Emmendingen / A. Lämmlein, W. Bauer // Beton und Stahlbetonbau. — 1950. — Heft 9. — S. 197—203.
- [57] Leonhardt F. Brücken aus Spannbeton, wirtschaftlich und einfach / F. Leonhardt, W. Bauer // Beton und Stahlbetonbau. — 1959, Heft 7 — S. 182-188; Heft 8 — S. 207—215.
- [58] Magnel G. Prestressed steel structures / G. Magnel // The Structural Engineer. — 1950. — № 11. — P. 285—295.
- [59] Magnel G. Prestressed Steel Structures / G. Magnel // The Structural Engineer. — 1950. — Vol. 28, Issue 11. — P. 285—295.
- [60] Magnel G. Long Prestressed Steel Truss Erected for Belgian Hangar / G. Magnel // Civil Engineering (London). — 1954. — Vol. 24, 10. — P. 38—39.

- [61] Sanabra-Loewe M. The four ages of early prestressed concrete structures / Marc Sanabra-Loewe, Joaquin Capellà-Llovera // PCI Journal. — 2014. № 59 (4) — P. 93—121.
- [62] Pellegrino C.C. Two step matrix analysis of prestressed cable nets / C.C. Pellegrino // Proceedings ; 3rd International Conference of Space Structures. — Elsevier : 1984 — P. 744–749.
- [63] Platte F. Die Olympia-Sporthalle in Squaw Valley / F. Platte // Stahlbau. — 1960. — Heft 2.
- [64] Snelson K. Continuous tension, discontinuous compression structures. — United States Patent № 3169611, 1965.
- [65] Sutherland J. The Birth of Prestressing? Iron Bridges for Railways 1830 to 1850 / J. Sutherland // International Journal for the History of Engineering and Technology. — 2009. — Vol. 79, No 1. — P. 113—130.
- [66] Torr C. Ancient ships / C. Torr. — Chicago : Argonaut, 1964.
- [67] Velflik A.V. Glavni trámové prihradové nosníky / A.V. Velflik // Staviteľství mostní. — Praha : CMT, 1905.
- [68] Wilhelmi O. Deutsches Reich Patent № 514122. 1929.
- [69] Zetlin L. Beamless floor and roof structure — United States Patent № 3971181, 1974
- [70] Guyon Y. Hormigón pretensado. Estudio Teórico y experimental / Yves Guyon. — Eyrolles, Paris, 1951. (Edición española, a partir de la primera edición francesa: Hormigón pretensado. Estudio Teórico y experimental; Incluye un prólogo de Eugène Freyssinet. — Dossat, Madrid, 1960).

## **Попередньо напружені металеві конструкції: історичний ОГЛЯД**

**Перельмутер А. В., д-р техн. наук**

HBO SCAD Soft, Україна

**Анотація.** Предметом розгляду є попереднє напруження конструкцій, тобто штучне створення в них до початку експлуатації внутрішніх зусиль і напружень для отримання або збільшення необхідних корисних якостей. Концепція попереднього напруження заснована на властивості статично невизначених механічних систем допускати в своїх елементах внутрішні зусилля і напруження при відсутності зовнішніх силових впливів. Основна увага в роботі приділена несучим будівельним металевим конструкціям. Проведено історичний аналіз становлення і розвитку прийомів штучного регулювання зусиль у таких конструкціях. Показані основні етапи реалізації цієї концепції, починаючи від інтуїтивних рішень давнини до розробки ефективних технологічних і конструктивних прийомів нашого часу. Вказані джерела зародження основних ідей в цій галузі та їх відображення і розвиток в теорії споруд. Описано приклади їх втілення в різних відомих конструктивних рішеннях. Найбільш репрезентативними серед них є мости, великопрогонові покриття, висотні споруди та сталеві листові конструкції.

**Ключові слова:** металеві конструкції, попереднє напруження, вантові системи, управління поведінкою

## **Pre-stressed metal structures : historical over view**

**A. Perelmuter, Dr. Sc. (Eng.),**

SCAD Soft, Ukraine

**Abstract.** The subject of consideration is preliminary stressing the structures, that is, artificial creation of internal forces and stresses in them to obtain or increase necessary useful qualities before operation. The concept of pre-stressing is based on the property of statically indeterminate mechanical systems to allow internal forces and stresses in their elements in the absence of external force effects. The main attention is paid to bearing metal structures. Historical analysis of formation and development of techniques for artificial regulation of forces in such structures has been carried out. The main stages for realization of this concept are shown, beginning from intuitive decisions of antiquity up to development of effective technological and constructive methods of our time. Origin sources of main ideas in this field and their reflection and development in the theory of structures are indicated. Examples of their implementation in various known design solutions are described. Bridges, large-span sheeting, high-rise structures and steel sheet structures are the most representative of them.

**Keywords:** metal constructions, pre-stressing, cable systems, behavior control.

*Надійшла до редакції 28.12.2017 р.*