

**К.В. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, Ю.С. ВОЛКОВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> НИИЖБ им. А.А. Гвоздева<sup>2</sup> ФГУП «НИЦ «Строительство»

# **ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОН: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

**K.V. MIKHAILOV<sup>1</sup>, Yu.S. VOLKOV<sup>2</sup>**<sup>1</sup> NIIZHB named after A.A. Gvozdev<sup>2</sup> FSUE "SIC "Construction

## **PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE: THE STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT**

Создание напряженного состояния в конструкции на стадии изготовления, когда знак напряжения в бетоне противоположен знаку напряжений от эксплуатационной нагрузки, является одним из крупнейших достижений инженерной мысли XX столетия. Широкое развитие преднапряжение в железобетонных конструкциях получило после опубликования работ Эжена Фрейссине (Франция) и Виктора Васильевича Михайлова (Россия).

В СССР предварительное напряжение применялось весьма широко в промышленном, жилищном, транспортном и специальном строительстве. Преднапряженных железобетонных конструкций выпускалось более 30 млн м<sup>3</sup> в год, что существенно больше, чем в какой-либо другой стране. На долю предварительно напряженных конструкций приходилось более 20 % общего объема сборного железобетона. Предварительно напряженные конструкции изготавливались, как правило, с натяжением арматуры на упоры во всех регионах страны. Такая широкая география этой технологии стала возможной благодаря, прежде всего, внедрению электротермического способа натяжения стержневой арматуры повышенной прочности. Авторы этого способа были по заслугам удостоены звания лауреатов престижной Ленинской премии. Для народного хозяйства были сэкономлены сотни тысяч тонн металла.

Был разработан значительный объем нормативно-технической литературы по проектированию и технологии изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций, в том числе впервые в мире по самонапряженным конструкциям и плитным конструкциям с непрерывным армированием.

А.А. Гвоздев рассматривал железобетон с обычной арматурой как частный случай (разновидность) предварительно напряженного железобетона.

СНиП 2.03.01.84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» прямо указывал (п. 1.4): «При выборе элементов должны предусматриваться преимущественно предварительно напряженные конструкции из высокопрочных бетонов». К сожалению, последняя редакция СНиП по железобетону таких указаний не содержит.

В настоящее время объем выпуска преднапряженных конструкций снизился в 10 раз, в то время как обычных железобетонных конструкций «только» в 5 раз. Такое резкое снижение объемов применения предварительно напряженных железобетонных конструкций в России следует однозначно квалифицировать как регресс теории и практики железобетона в целом.

Не получили должного изучения и применения предварительно напряженные конструкции с натяжением арматуры на бетон, в результате чего эти

эффективные конструкции очень редко используются при строительстве инженерных сооружений. В России большепролетные мосты чаще строятся из стали. Правда, следует отметить некоторые успехи в области расширения применения преднапряжения в построекных условиях при возведении зданий различного назначения.

Убедительной демонстрацией эксплуатационной надежности предварительного напряжения железобетона является его успешное использование для производства шпал. Во всем мире в настоящее время их установлено более миллиарда штук. Жесткие динамические нагрузки, ощущимые температурные перепады, увлажнение, замораживание, попадание смазочных и иных материалов предъявляют исключительно высокие требования к надежности и долговечности железобетонных шпал. Есть шпалы, установленные 50 лет назад и эксплуатирующиеся до сих пор без каких-либо повреждений.

В настоящее время в большинстве развитых стран мира из предварительно напряженного железобетона изготавливается основной объем конструкций перекрытий и покрытий для одноэтажных и многоэтажных производственных, жилых и общественных зданий, значительная часть изделий, используемых в инженерных сооружениях для всех отраслей строительства.

Из железобетона возводятся промышленные и жилые здания, объекты соцкультбыта, плотины, энергетические комплексы и так далее. Самые высокие в мире телебашни в Москве и Торонто построены из преднапряженного железобетона. Самые высокие здания на всех континентах имеют монолитный железобетонный каркас, в том числе и мировой рекордсмен – небоскреб в Дубае высотой более 700 м, или 160 этажей (строительство должно быть завершено в 2008 г.). Бетон в процессе строительства должен быть подан на высоту 570 м под давлением до 250 атм. по бетоноводу диаметром 150 мм. Бетон класса В80 для стен нижних частей здания и В50 для колонн и стен верхних этажей и всех перекрытий. Железобетон уверенно вытесняет сталь из этой области строительства.

Обширной областью применения монолитного предварительно напряженного железобетона являются инженерные сооружения (градирни, трубы, резервуары, защитные оболочки АЭС и т. д.). Современные градирни достигают высоты 150 м. Резервуары для хранения воды, сжиженного газа и т. д. могут достигать объема в несколько сотен тысяч кубометров.

Предварительно напряженная арматура в монолитных железобетонных конструкциях (перекрытия, мосты, высотные сооружения и т. д.) в последнее время применяется без сцепления с бетоном. Для защиты от коррозии арматурные элементы (канаты) помещаются в специальные оболочки, заполненные анткоррозионным составом.

Следует отметить, что монолитный предварительно напряженный железобетон, помимо традиционных строительных целей, нашел широкое применение для корпусов реакторов и защитных оболочек АЭС. В настоящее время мощность атомных электростанций в мире превышает 200 млн кВт, в том числе доля АЭС с применением преднапряженного железобетона корпусов реакторов и защитных оболочек составляет более 100 кВт. Защитных оболочек реакторов АЭС из преднапряженного железобетона построено уже более 100. Отсутствие защитной оболочки реактора на Чернобыльской АЭС привело к катастрофе, поскольку способствовало развитию аварии, последствия которой неясно когда сойдут на нет.

Известно, что после чернобыльской аварии строительство АЭС во многих странах было остановлено, но вскоре, почти повсеместно, было возобновлено. В России до 2025 г. планируется построить более 40 энергоблоков.

Ярким примером строительных возможностей преднапряженного железобетона являются морские платформы для добычи нефти высотой в несколько сотен метров.

Обширной областью применения предварительно напряженного железобетона является мостостроение. Только в США построено более 500 тыс. железобетонных автодорожных мостов с различными пролетами. За последнее время там построено более 30 вантовых мостов длиной 600–700 м с центральными пролетами от 192 до 400 м. Из предварительно напряженного железобетона в США сооружаются не только внеклассные мосты. Мосты пролетом до 50 м в США сооружаются только в сборном варианте из железобетонных преднапряженных балок.

Достижения в мостостроении имеют не только США.

Среди перевозимых автотранспортом преднапряженных сборных элементов рекордным можно назвать балки пролетного строения моста в Голландии массой 230 т, высотой сечения 2,4 м, шириной 1,6 м. Балки длиной 42,8 м были изготовлены с точностью 1 см, общие усилия натяжения напрягаемой арматуры в одном элементе составили 3000 тс. Дистанция транспортирования превысила 100 км. Общая длина трейлера для транспортирования балок со 164 колесами составила 63 м.

Мировой рекорд для вантовых мостов принадлежит мосту «Васко да Гама» в Лиссабоне, построенному ко Всемирной выставке ЭКСПО-98. Общая протяженность мостового перехода превышает 18 км. Основные несущие конструкции моста, пилоны и пролетные строения были выполнены из бетона класса В45. Гарантированный срок службы моста составляет 120 лет по критерию долговечности бетона.

В трудах XVIII международного конгресса по сборному железобетону в качестве примеров опытного строительства приведен автомобильный мост во

Франции из сборных балок, изготовленных из бетона прочностью 200 МПа. Балки типа 2Т пролетом 22 м имели высоту сечения 0,9 м и ширину 2,2 м, толщина ребер составляла 15 см. Балки армированы только продольной напрягаемой арматурой. Масса пролетного строения была меньше на 2/3, чем масса пролетного строения из обычного железобетона. Аналогичные примеры применения сверхпрочного бетона в мостовых конструкциях имеются в Японии, Голландии, Канаде.

Изготовление сборных железобетонных конструкций с применением высокопрочного бетона классов В40–В60 возможно на рядовых портландцементах марок М550–М600. Применение бетонов высоких классов наиболее эффективно для колонн одноэтажных и многоэтажных зданий, стропильных ферм и балок, большепролетных плит покрытий, других конструкций. Так, в КНР преднапряженные сваи длиной до 30 м изготавливают из бетона класса В100. В действующем европейском стандарте EN 206-1 «Бетон. Общие технологические требования и контроль качества» указан бетон класса по прочности на сжатие В115.

Развитие преднапряженных конструкций перекрытий жилых и общественных зданий связано с увеличением их пролетов, поскольку переход к проектированию зданий с широким шагом поперечных стен и колонн будет развиваться все интенсивнее. В Великобритании ежегодно возводится 1,5 млн м<sup>2</sup> перекрытий с натяжением арматуры в бетон. Для безбалочных покрытий за счет предварительного напряжения пролет плит может быть увеличен до 13 м, по сравнению с 9 м в обычном железобетоне.

В структуре сборных конструкций в США из общего объема производства сборных железобетонных конструкций объем производства преднапряженных конструкций составляет 40 %.

Возможности повышения эффективности сборных железобетонных конструкций можно показать на примере плит перекрытий. В России на долю этих изделий приходится более трети общего производства сборных элементов. За рубежом значительное распространение имеет безопалубочное формование плитных конструкций на длинных стенах. Там обычной практикой является производство плит пролетом до 17 м, высотой сечения 40 см под нагрузку до 500 кгс/м<sup>2</sup>. В Финляндии железобетонные многопустотные плиты под такую же нагрузку выпускаются высотой сечения даже 50 см с пролетом до 21 м, то есть применение предварительного напряжения позволяет выпускать сборные элементы качественно иного уровня. Натяжение канатной арматуры на таких стенах, как правило, групповое при мощности домкратов 300–600 т. Сегодня разработаны различные системы безопалубочного формования на длинных стенах, отличающиеся производительностью, применяемой арматурой, технологическими требова-

ниями к бетону, формой поперечного сечения панелей и другими параметрами. На стенах длиной до 250 м изготавливают плиту со скоростью до 4 м/мин; по высоте в пакете можно бетонировать 6 плит. Ширина плит достигает 2,4 м, максимальный пролет при разрезке может достигать 21 м. Только плит «Спэнкрайт» применяют в США более 15 млн м<sup>2</sup> ежегодно.

Важное значение имеет расширение областей применения предварительного напряжения в резервуаростроении, особенно в емкостях для хранения нефти и нефтепродуктов, в центрифугированных конструкциях (колоннах, сваях, трубах и др.), плитных изделиях для перекрытий небольших пролетов и перемычках, несущих конструкциях зданий, возводимых методом подъема перекрытий, каркасных и крупнопанельных зданиях. Перспективно использование предварительного напряжения в монолитных железобетонных конструкциях, в том числе на основе применения натяжения арматуры на бетон (с восстановливаемым сцеплением и без сцепления).

Зарубежный опыт показывает значительную эффективность применения предварительного напряжения в монолитных плитных фундаментах большой протяженности, безбалочных монолитных перекрытиях, опорных устройствах и постаментах под тяжелое оборудование, несущих монолитных конструкциях подземных сооружений, в том числе многоэтажных.

Имеются интересные примеры применения предварительного напряжения при реставрации памятников старины.

Исключительно плодотворной является идея двух- и трехосного напряжения конструкций. Обширные исследования подобных конструкций были проделаны профессором В.В. Михайловым и его учениками. В.В. Михайлов разработал даже проект башни высотой 2 км, смонтированной из трехосно предварительно напряженных элементов заводского изготовления.

Расчетные сопротивления сжатию в стойках башни составляли 150 МПа. Такие элементы изготавливаются из бетонов, по нынешним понятиям, средних классов (В40–В50). В реальных испытаниях элементов, имеющих спиральную предварительно напряженную обойму, напряжения в бетоне достигали 300 МПа при сохранении линейной зависимости между приростом напряжения и приростом деформаций до 150 МПа.

В объемно-напряженных архитравах гидравлических прессов с железобетонными станинами бетон работал упруго при напряжениях, втрое превышающих его кубиковую прочность.

Идея применения предварительного напряжения в железобетоне в свое время оказалась настолько плодотворной, что в 1953 г. была основана Международная федерация по предварительно

напряженному железобетону – ФИП. Первым президентом ФИП стал Эжен Фрейссине. В последнем, XV конгрессе ФИП в Неаполе приняли участие более полутора тысяч человек. В работе федерации принимают участие десятки стран, что свидетельствует о широкой географии распространения преднапряженного железобетона.

Поступательному развитию преднапряженного железобетона способствует дальнейшее улучшение прочностных и технологических свойств применяемых материалов. Конец XX века ознаменовался разработкой особопрочных бетонов и неметаллической арматуры на основе углепластиков, открывающих новые возможности совершенствования конструктивно-технологических решений зданий и сооружений и методов предварительного напряжения. Предварительное напряжение, хотя и ограничено, стало применяться и в других видах конструкций – стальных, деревянных, каменных.

Нет сомнения, что развитие предварительного напряжения – основной путь совершенствования железобетонных конструкций как таковых.

В последние годы темпы развития строительства в России опережают темпы развития других отраслей экономики. Надо надеяться, что и предварительно напряженный железобетон в России также откроет новую страницу в своей истории.

### Информация об авторах / Information about the authors

**Константин Васильевич Михайлов**, д-р техн. наук, профессор, почетный член РААСН, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, Москва

**Konstantin V. Mikhailov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Honorary Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, Moscow

**Юрий Сергеевич Волков**, канд. техн. наук, советник РААСН, ФГУП «НИЦ «Строительство», Москва

**Yuri S. Volkov**, Cand. Sci. (Engineering), Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, FSUE "SIC "Construction", Moscow

Статья впервые опубликована:

80-летие НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. Сборник научных статей. Москва: Издательство ФГУП «НИЦ «Строительство»; 2007. 272 с.



### **Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Морозостойкость бетона. Обзор. М.: АО «НИЦ «Строительство», 2023. 156 с.**

Монография посвящена изучению проблеме морозостойкости бетона. Авторы рассматривают широкий круг вопросов, касающихся гипотез морозостойкости, методов испытаний, назначения марок по морозостойкости, а также технологии изготовления морозостойких бетонов и оценки состояния бетона в конструкциях после длительной эксплуатации в условиях морозного воздействия.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся изучением бетона и железобетона, инженерно-технических работников проектных и строительных организаций, преподавателей и студентов соответствующих вузов.

*По вопросам приобретения обращаться в редакционно-издательский отдел  
АО «НИЦ «Строительство».*

#### **Контакты:**

e-mail: [pochininane@cstroy.ru](mailto:pochininane@cstroy.ru)

тел.: +7 (495) 602-00-70 доб. 1022, 1023