Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №1, Том 6 / 2019, No 1, Vol 6 <https://t-s.today/issue-1-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS119.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS119 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS119>)

Статья поступила в редакцию 25.12.2018; опубликована 12.02.2019

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кео Ун, Топилин А.Н. Исторические аспекты применения преднапряженного бетона в мировой и российской строительной индустрии // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №1, <https://t-s.today/PDF/12SATS119.pdf> (доступ свободный). Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS119

For citation:

Keo Oun, Topilin A.N. (2019). Historical aspects of prestressed concrete application in the Russian construction industry. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS119

УДК 72

Кео Ун

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Кафедра «Железобетонных и каменных конструкций»
Аспирант
E-mail: keomgsu@gmail.com

Топилин Александр Николаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Кафедра «Железобетонных и каменных конструкций»
Преподаватель
Кандидат технических наук, доцент

Исторические аспекты применения преднапряженного бетона в мировой и российской строительной индустрии

Аннотация. Статья включает историю разработки, внедрение, практику применения и рассмотрение перспектив развития технологии предварительного напряжения железобетона в России. Важным является расширение области применения технологии преднапряжения. На основе анализа зарубежной практики можно заключить, что такая технология находит широкое применение в дорожном строительстве. Высоким уровнем жёсткости и трещиностойкости предварительно напряженного железобетона определяется уровень эффективности его использования в процессе возведения автомагистралей, а также взлётно-посадочных полос. За счет предварительного напряжения, увеличивающего жесткость и сопротивление конструкций образованию трещин, повышается их выносливость при работе на воздействие многократно повторяющейся нагрузки. Причина этому – уменьшение перепада напряжений в арматуре и бетоне, который вызывает изменение величины внешней нагрузки. У правильно спроектированных конструкций и зданий в целом уровень безопасности достаточно высок, и их можно эксплуатировать также в сейсмоопасных зонах. Указанная технология способствует развитию высотного строительства, где основную проблему связывают с тем, что верхними этажами чрезвычайно нагружаются нижние. Зарубежным опытом доказывается высокая эффективность применения предварительного напряжения для таких объектов, как

монолитные плитные фундаменты, имеющие большую протяженности, монолитные безбалочные перекрытия, опорные устройства и постаменты под тяжелое оборудование, несущие монолитные конструкции подземных сооружений, в том числе многоэтажные. Также предварительное напряжение достаточно актуально при реставрации исторических памятников. На основе анализа практики можно заключить, что предварительным напряжением железобетона демонстрируются новые возможности и определяется перспектива развития железобетона в качестве материала, используемого для возведения современных зданий и сооружений.

Ключевые слова: преднапряженный бетон; возведение зданий; сооружений; жесткость; трещиностойкость

Динамика развития строительной отрасли достаточно высока, и на протяжении целых веков человечество стремилось к совершенствованию качества строительных материалов: так, в течение длительного периода их эволюции у ученых всегда было желание изобрести и реализовать некий суррогат камня, следствием чего стал бетон, которому свойственны отрицательные качества – невысокая прочность при растяжении. За счет использования стальной скорости разрушения бетона несколько снижается, то достаточно редко удается избежать трещин; данное условие может быть исключено посредством применения арматуры и фибры одновременно, но при этом снижается материалоемкость и экономическая выгода от использования конструкции [5]. Соответственно, для повышения эксплуатационных свойств конструкций в целом необходим был поиск нового решения данной проблемы, в результате которого было создано напряженное состояние в конструкции: знак напряжения в бетоне становится противоположен знаку напряжения от эксплуатационной нагрузки.

Решение проблемы обеспечения конструктивной безопасности сооружений нашло отражение в ряде работ таких авторов, как В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, В.Н. Байков, А.А. Гвоздев, Н.И. Карпенко, Б.С. Расторгуев, В.Д. Райзер и пр. Благодаря этим и другим исследованиям в рамках рассматриваемой проблемы достаточно полно разработаны теория и методы расчета прочности конструктивных элементов при различных силовых воздействиях. В работах таких авторов, как А.В. Александров, В.В. Болотин, В.М. Бондаренко, Г.А. Гениев, Н.И. Карпенко, Н.В. Ключева, К.П. Пятикрестовский, В.П. Чирков, В.С. Федоров и др. предложены основные направления таких исследований, и решены отдельные задачи применения преднапряженного бетона.

Обратимся к истории вопроса. Преднапряжение изобрел Эжен Фрейссине в начале XX века. В СССР использование предварительного напряжения было достаточно популярно, его применяли в процессе промышленного, жилищного, транспортного и специального строительства. Объем выпуска предварительно напряженных конструкций составлял более 30 млн м³ в год, что составляло более 20 % общего объема производства сборного железобетона.

Наиболее распространенной была технология, при которой арматура натягивалась на упоры. Использование данного метода стало популярным также потому, что был внедрен электротермический способ натяжения стержневой арматуры. В рамках данного способа, арматурная заготовка (стержневая, проволочная или прядевая), нагретая электрическим током до нужного удлинения, закреплялась в нагретом состоянии при помощи жестких упоров или на торцах затвердевшего элемента. За счет специальных упоров и торцов создавались препятствия укорочению заготовки при остывании, поэтому она обладала заданными растягивающими напряжениями [7]. Требуемая арматурная заготовка, предназначенная для натяжения на упоры форм, поддонов или стендов, была снабжена по концам анкерами, которые располагались так,

чтобы длина расстояния между внутренними (опорными) плоскостями анкеров была меньше на заданную величину, чем расстояние между наружными гранями упоров. Удлиненная заготовка должна быть свободно уложена в нагретом состоянии между упорами. При этом, для стержневой арматуры максимальная температура нагрева не должна быть более 350 °С, а для проволочной – 300 °С.

Авторы данной технологии способствовали экономии миллионов тонн дефицитного тогда металла и резкому улучшению технологии и экономики конструкций [7].

Вместе с этим также было инициировано введение электротермомеханического (комбинированного) способа натяжения, сочетающего в себе электротермический и механический способ натяжения, которые осуществлялись одновременно. Если имеет место электротермомеханический способ натяжения, то около 50 % напряжения обеспечивается посредством механического натяжения и 50 % – при остывании нагретой проволоки. Это способствует двойному увеличению производительности машин, облегчению их конструкции, повышению контролируемого предварительного напряжения. Особенно эффективным этот способ может быть при натяжении арматуры на затвердевший бетон криволинейных элементов, так как за счет него снижается неравномерность натяжения и уменьшаются потери натяжения в результате трения.

Закрепление успеха имело место в 60-х годах, когда был подъем тотального увлечения сборным железобетоном, и предварительно напряженный бетон рассматривали в качестве основного конструкционного материала [4].

В указанный период учеными и специалистами отрасли был разработан значительный объем нормативно-технической литературы в рамках расчета, проектирования и технологии изготовления предварительно напряженных железобетонных конструкций, что выступило в качестве надежного фундамента, чтобы в дальнейшем эффективно развивать это направление. В качестве основного документа выступил ВСН 117-65, который, хотя и был разработан для мостов, в целом рассматривал весь комплекс технологических аспектов предварительно напряженного бетона¹.

Дальнейшим развитием предварительного напряжения было оказано серьезное влияние на технологии высокопрочных бетонов. Преднапряженные конструкции получили возможность максимально эффективного использования повышенной прочности бетона при сжатии.

В период перестройки процесс интенсивного развития преднапряженного железобетона почти остановился. Почти везде останавливали производства, Стенды, опалубка, металлоемкое оборудование отправляли в металлолом.

Наиболее сильное снижение было отмечено при применении сборных предварительно напряженных конструкций. Падение объема выпуска преднапряженных конструкций произошло более, чем в 10 раз, при этом, объем выпуска железобетонных конструкций без предварительного напряжения снизился в 6 раз. Причин этому несколько, к ним можно отнести и сильно подорожавшую электроэнергию, что привело к снижению экономической выгоды электротермического способа натяжения арматуры [2].

Сегодня почти у всех регионов России имеются производственные мощности, способные произвести более 1 млн м³ в год сборного, в том числе предварительно напряженного железобетона. Была расширена и номенклатура изделий, в процессе изготовления которых использовалось предварительное напряжение: это касается покрытий

¹ По материалам <https://samstroy.com/история-применение-перспективы-разв/>.

зданий, пролетных строений и опор мостов, железобетонных свай и труб, шпал, опор ЛЭП и мачт освещения, телебашен, защитных оболочек, морских и шельфовых сооружений, плавучих доков, корпусов понтонов и многого другого.

Преимущества предварительно напряженных конструкций широко используются в мостостроении: так, путем использования предварительно напряженной арматуры возможно создание обжатых стыков в сборных конструкциях, это позволяет экономить металл, идущий на закладные части, и повысить качество стыков. Преднапряженная арматура позволяет применять такие прогрессивные способы сооружения железобетонных мостов, как навесное бетонирование и навесная сборка, позволяющих снизить трудоемкость и сократить сроки строительства. Необходимо помнить, что технология изготовления преднапряженных мостовых конструкций сложнее, чем конструкций без предварительного напряжения: для этого требуются специальные устройства для натяжения арматуры и квалифицированный обслуживающий персонал. Этот недостаток компенсирует развитие производственной базы для изготовления элементов мостовых конструкций с предварительным напряжением, создание высокопроизводительного оборудования и совершенствование технологии изготовления конструкций и монтажа преднапряженных железобетонных мостов.

Итак, технология предварительного напряжения бетонных изделий выступает сейчас одной из инноваций строительной области, она создает так называемое обжатие бетона и придает изделию принципиально иные характеристики. За счет реализации проектов, предполагающих использовать прогрессивные конструктивно-технологические схемы возведения зданий бетона с применением технологий преднапряжения будет способствовать преодолению основных недостатков строительства: позволит снизить себестоимость, трудоёмкость и длительность строительно-монтажных работ. Но необходимо сказать, что особенности преднапряженных бетонных конструкций дадут больший эффект в зданиях и сооружениях, имеющих такие пролеты, нагрузки и условия работы, когда применять бетонные конструкции, не имеющие предварительного напряжения, с технической точки зрения нельзя, или же такая ситуация может характеризоваться чрезмерно большим перерасходом бетона и стали, чтобы обеспечить требуемую жесткость и несущую способность. Совмещая две передовые технологий производства изделий из преднапряженного бетона, можно придать изделию принципиально новые характеристики². Соответственно, для того чтобы уточнить особенности проектирования изделий из преднапряженного бетона, проанализируем основные характеристики таких изделий.

Практикой производства предварительно напряженных бетонных конструкций и изделий отмечено, что посредством данной технологии значительно оптимизируется процесс выполнения работ и в гражданском, и в промышленном строительстве. Опытом строительных организаций демонстрируется эффективность применения метода в том случае, если изготавливаются:

- плитные фундаментные основания;
- монолитные и сборные большепролетные перекрытия;
- опорные конструкции и постаменты, предназначенные, чтобы разместить тяжелое оборудование;
- несущие системы подземных сооружений (как одноэтажных, так и многоэтажных).

² По материалам www.enerprom.ru.

Имеются также примеры применения преднапряженных бетонов при проведении реставрационных работ с памятниками. В таких сооружениях функционирование бетона происходит при нагрузках, которые втрое превышают прочность в подобных изделиях, где производится армирование стержневой арматурой и сварными сетками³.

Уровень трещиностойкости предварительно напряженных конструкций в два-три раза превышает трещиностойкость тех железобетонных конструкций, где отсутствует предварительное напряжение. Также несущие характеристики материалов позволяют повышать конструктивные, а не технологические методики. Преднапряжение, способствующее увеличению жесткости и сопротивления конструкций образованию трещин, способно повысить их выносливость при работе и устойчивость воздействию многократно повторяющейся нагрузки. У правильно запроектированных предварительно напряженных конструкций и зданий отмечается высокий уровень эксплуатационной безопасности и очень высока надежность, особенно это важно в сейсмоопасных зонах. За счет технологии преднапряжения железобетона снижается общий вес зданий до 40 %, так как существенно сокращаются расходы арматурной стали и бетона в конструкциях. Она дает возможность значительно шагнуть вперед в области высотного строительства, где комплекс основных проблем связан с наличием чрезмерной нагрузки, осуществляемой верхними этажами на нижние.

За счет предварительного напряжения появляется возможность увеличения этажности в два раза, так же есть возможность, при этом, избежать конструктивных дефектов. Кроме того, сокращаются и строительные затраты до 30 %. Кроме экономического эффекта, при строительстве объектов, где используются преднапряженные конструкции, имеется возможность существенного расширения архитектурно-планировочных возможностей проектируемых зданий и сооружений. Рядом показателей, как шаг колонн до 18 м, при этом плоские безбалочные плиты перекрытий высотой до 27 см, вместе с широкими возможностями расстановки стен и перегородок определяется качественный прорыв, определяющий планировочные и функциональные характеристики зданий и сооружений.

Предварительным напряжением бетона в конструкциях открывается ряд новых возможностей и определяются широкие перспективы развития железобетона, выступающего материалом для сооружения современных объектов. Но наряду с положительными качествами предварительное натяжение железобетонных конструкций обладает и своими технологическими особенностями⁴. Достичь состояния предварительного напряжения в материале возможно за счет применения спецоборудования, точных расчетов, трудоемкого конструирования и затратного производства. Продукцию необходимо бережно хранить, транспортировать и монтировать.

Просчетами в проектировании и технологии производства может быть вызван процесс полного разрушения создаваемого железобетонного изделия. Предварительно напряженным конструкциям необходима специализированная металлоемкая опалубка. За счет больших значений звуко- и теплопроводности необходимо заложить в тело камня компенсирующие материалы. Такие железобетонные конструкции обеспечивают снижение порога огнестойкости (так как снижается уровень критической температуры нагрева преднапряженной арматурной стали) в сравнении с обычным железобетоном.

Преднапряженная бетонная конструкция находится под воздействием выщелачивания, растворов кислот и сульфатов, солей, провоцирующих коррозию цементного камня, раскрытие

³ По материалам <https://stefs.ru/publication/prednapryazhennyj-zhelezobeton-istoriya-primenenie-perspektivy-razvitiya.html>.

⁴ По материалам <https://samstroy.com/история-применение-перспективы-разв/>.

трещин и коррозию арматуры. Это может резко снижать несущую способность стали и провоцировать внезапное хрупкое разрушение. Также к отрицательным моментам относится значительный вес изделий, несмотря на то что он является более низким, чем у таких же изделий без предварительного напряжения. Однако учет указанных отрицательных сторон, несомненно, позволяет избежать их при проектировании и эксплуатации.

Нельзя не отметить, что даже с учетом всех вышеперечисленных преимуществ, темпы развития технологии предварительно напряженного бетона сопряжены с чередой технологических трудностей, прежде всего, это касается низкой осведомленности и неумения проектировать преднапряженные конструкции большинством проектировщиков, так как для расчета преднапряженных конструкций необходим соответствующий опыт и квалификация. Соответственно, подобные трудности также нужно учесть, чтобы они негативно не отражались на результатах деятельности по проектированию зданий и сооружений из преднапряженных бетонов.

Таким образом, развитие производства предварительно напряженных железобетонных конструкций необходимо, чтобы в дальнейшем совершенствовать отечественное капитальное строительство. Мы считаем, что предварительно напряженный железобетон в России способен к открытию новой страницы в своей истории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров, А.П. Анализ конкурентоспособности предварительно напряженных крупноразмерных изделий из автоклавного газобетона [Текст] / А.П. Макаров // Вестник Ивановского государственного политехнического университета. – 2014. – № 1. – С. 61.
2. Граник, В.Г. Преднапряженные конструкции изделий с внутренними анкерами – путь к снижению себестоимости изделий [Текст] / В.Г. Граник // Строительные материалы. – 2013. – № 1. – С. 4.
3. Сапрыкин, Ю.М., Саяпин, Д.Г. Изготовление преднапряженных конструкций в формах с внутренними несмещаемыми упорами [Текст] / Ю.М. Сапрыкин, Д.Г. Саяпин // Вестник КГТУ. – 2015. – № 3. – С. 43-48.
4. Санникова, О.Г., Кондратчик, Н.И. Предварительное напряжение арматуры комбинированным способом [Текст] / О.Г. Санникова, Н.И. Кондратчик // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2016. – № 4. – С. 18.
5. Осипенко, Ю.Г., Кузнецов, В.С. Влияние применения высокопрочной арматуры без сцепления с бетоном на прочность монолитных безбалочных покрытий [Текст] / Ю.Г. Осипенко, В.С. Кузнецов // Вестник МГСУ. – 2015. – Том. 12. Вып. 7. – С. 885.
6. Шарипов, Р.Ш., Зенин, С.А. Проблемы расчета предварительно напряженных железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном по первой и второй группам предельных состояний и способы их решения [Текст] / Р.Ш. Шарипов, С.А. Зенин // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – № 1. – С. 129.
7. Малиновский, В.Н., Кривицкий, П.В. Особенности расчета и конструирования приопорных зон преднапряженных железных балок с пологим отгибом продольной рабочей арматуры [Текст] / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий // BELNIPS. – 2014. – № 2. – С. 28.
8. Кондратчик, А.А., Железобетонные конструкции с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом [Текст] / А.А. Кондратчик // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5. – С. 44-53.
9. Кондратчик, А.А., Повышение эффективности использования арматуры приопорной зоны железобетонных балочных элементов (А.А. Кондратчик, О.Г. Гарах) [Текст] / А.А. Кондратчик // Вестник ПГУ. Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 6. – С. 60-64.
10. Сасонко, Л.В. Исследование изгибаемых предварительно напряженных железобетонных конструкций с отогнутой арматурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 [Текст] / Л.В. Сасонко; НИИЖБ. – М., 1974 – 22 с.
11. Войлоков И.А. История применения преднапряженного бетона (преднапряжения) в отечественном строительстве / Промстройконтракт / 2009 год / <https://psk-holding.ru/library/articles/files/prednapryazhenie-betona-v-stroitelstve-history.php>.

Keo Oun

National research Moscow state building university, Moscow, Russia
E-mail: keomgsu@gmail.com

Topilin Alexander Nikolaevich

National research Moscow state building university, Moscow, Russia

Historical aspects of prestressed concrete application in the Russian construction industry

Abstract. The article is devoted to the history of development, implementation, practice and prospects of development of reinforced concrete prestressing technology in Russia. It is important to expand the scope of application of prestressing technology. As practice shows abroad, it is widely used in road construction. The high level of rigidity and crack resistance of prestressed concrete determines the effectiveness of its use in the construction of highways and runways. Pre-stress, which increases the rigidity and resistance of structures to cracking, increases their endurance when working on the impact of repeated loads. This is due to a decrease in the voltage drop in the reinforcement and concrete, caused by changes in the external load. Properly designed structures and buildings are generally safe to use and more reliable, especially in seismic areas. On the basis of this technology can be made a significant step forward in the field of high-rise construction, where the main problem is due to the fact that the upper floors are extremely loaded lower. In the proposed embodiment, the number of storeys of the building can be doubled without increasing the load on the ground floor and the base. International experience shows high efficiency of the high efficiency of application of the preliminary voltage monolithic slab foundations of long, monolithic beamless slabs, the supporting device and the pedestals under heavy equipment, in load-bearing monolithic constructions of underground structures, including multi-storey. There are examples of pre-stress during the restoration of historical monuments. As practice shows, the prestressing of reinforced concrete demonstrates new opportunities and defines the prospect of development of reinforced concrete as a material for the construction of modern buildings and structures.

Keywords: prestressed concrete; the construction of buildings; structures; hardness; fracture toughness

REFERENCES

1. Makarov A.P. (2014). Analysis of the competitiveness of pre-stressed large-sized products from autoclaved aerated concrete. *Bulletin of the Ivanovo State Polytechnic University*, 1, pp. 61 (in Russian).
2. Granik V.G. (2013). Pre-stressed structures of products with internal anchors – let them reduce the cost of products. *Construction materials*, 1, pp. 4 (in Russian).
3. Saprykin Yu.M., Sayapin D.G. (2015). Manufacturing of prestressed structures in forms with internal non-movable stops. *Bulletin Kaliningrad State Technical University*, 3, pp. 43-48 (in Russian).
4. Sannikova O.G., Kondratchik N.I. (2016). Preliminary tension of reinforcement by the combined method. *Bulletin of Brest State Technical University*, 4, p. 18 (in Russian).
5. Osipenko Yu.G., Kuznetsov V.S. (2015). The impact of the use of high-strength reinforcement without adhesion with concrete on the strength of monolithic non-beam coatings. *Bulletin Moscow State University of Civil Engineering*, 7(12), p. 885 (in Russian).
6. Sharipov R.SH., Zenin S.A. (2017). Problems of calculation of prestressed reinforced concrete structures without adhesion of reinforcement to concrete in the first and second groups of limit states and methods for solving them. *Academia. Architecture and construction*, 1, p. 129 (in Russian).
7. Malinovskiy V.N., Krivitskiy P.V. (2014). Features of the calculation and design of supporting areas of prestressed iron beams with a gentle bend of the longitudinal working reinforcement. *BELNIIS*, 2, p. 28 (in Russian).
8. Kondratchik A.A. (2008). Reinforced concrete structures with reinforcement, prestressed by a combined method. *Construction Science and Technology*, 5, pp. 44-53 (in Russian).
9. Kondratchik A.A., Garakh O.G. (2007). Improving the efficiency of using reinforcement in the support zone of reinforced concrete girder elements. *Vestnik Penza State University. Applied Science. Building*, 6, pp. 60-64 (in Russian).
10. Sasonko L.V. (1974). Issledovanie izgibaemykh predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh konstruktsiy s otognutoy armaturoy. [*Investigation of flexible prestressed concrete structures with bent reinforcement.*] Moscow: Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, p. 22.
11. Promstroykontrakt. (2009). Voylov I.A. *The history of the use of prestressed concrete (prestressing) in domestic construction*. [online] Available at: <https://psk-holding.ru/library/articles/files/prednapryazhenie-betona-v-stroitelstve-history.php> (in Russian).