

## Перспективы применения нанобетона в монолитных большепролетных ребристых перекрытиях с постнапряжением

*Магистр ГОУ СПГПУ Е.В. Кишиневская\*;  
д.т.н., профессор ГОУ СПГПУ Н.И. Ватин;  
профессор ГОУ СПГПУ В.Д. Кузнецов*

При проектировании и строительстве конструкций существенную роль играет выбор материала — бетона. От него будет зависеть прочность, надежность конструкций и сооружения в целом. Нанобетон, характеризующийся высокими физико-механическими показателями, открывает новые возможности для проектирования и строительства.

Проявившийся в последнее время повышенный интерес к программам работ в области нанотехнологии вызвал в строительном материаловедении появление своеобразного термина «нанобетон», не имеющего однозначного толкования в научно-технической литературе. Нанобетон — это группа методов и спектр наноматериалов, использование которых (в совершенно различных сочетаниях) позволяет управлять набором свойств строительных композиций на основе минеральных вяжущих, даже необязательно цементных. Общий признак: нанобетон обладает теми или иными преимуществами благодаря своей особой структуре, задаваемой на наноуровне. Нанобетонами могут являться и быть названы бетоны совершенно различных классов и марок. При этом разработка рецептур и технологий, использующих этот новый подход, находится в настоящее время на начальной стадии. Нанобетон не является каким-то определенным ярким составом, реализующим узкую строительную или строительско-дорожную задачу.

В последние десятилетия в строительной химии появились новые виды пластифицирующих добавок к бетонам, основанных на использовании поликарбоксилатов и их производных, отличающихся чрезвычайно высокой пластифицирующей способностью [5]. Однако их широкое применение сдерживается весьма значительной стоимостью — более \$3-8 за кг. В этих условиях, крайне актуальной задачей является поиск и исследование путей снижения технологических концентраций пластификаторов в цементных растворах.

НТЦ Прикладных нанотехнологий создал оригинальную методику решения этой задачи, основанную на практическом использовании принципиально новых физических явлений, связанных с возможностями нанотехнологий. В 1999-2008 гг. была создана серия новых строительных материалов — «нанобетонов», в том числе, были улучшены потребительские свойства пластификаторов бетонных смесей за счет их микромодификации фуллероидными нанодобавками [1].

Был разработан и поставлен на производство, в том числе, «Бетон наноструктурированный легкий» со следующими характеристиками:

- плотность —  $1,2 \div 1,6 \text{ т/м}^3$ ;
- прочность на сжатие —  $30 \div 60 \text{ МПа}$ ;
- прочность на изгиб —  $4 \div 8 \text{ МПа}$ ;
- теплопроводность — менее  $0,2 \div 0,4 \text{ Вт/(м·К)}$ ;
- водопоглощение не более  $0,4\%$ ;
- водонепроницаемость —  $W20$ ;
- огнестойкость — более  $780^\circ\text{C}$ ;
- морозостойкость —  $F300-F350$ .

«Нанобетон легкий» ТУ-5789-027-23380399-2007 может быть отнесен к бетонам следующего класса: B35; F300-350; W16-20; П 4; D  $1,6 \text{ т/м}^3$ .

Использование фуллероидных наномодификаторов в каталитических количествах позволяет при всех прочих равных условиях усилить пластифицирующий эффект на величину от 30 до 100%.

Такое же использование наномодификаторов позволяет увеличить прочность бетона на 20-25%. Эта величина является нижней оценкой эффекта, поскольку при уменьшении В/Ц, очевидно, будет получено дополнительное увеличение прочности.

Пластичность цементной смеси увеличивается в первые 1-2 часа после приготовления еще примерно на 20%.

Повышенная трещиностойкость и прочность на сжатие, а также снижение плотности нанобетона при одновременном повышении физико-механических показателей имеет большой практический интерес для проектирования.

Легкий нанобетон обладает рядом одновременных уникальных свойств:

- довольно высокая прочность;
- высокая огнестойкость;
- высокая морозостойкость;
- низкое водопоглощение;
- низкая плотность (удельный вес);
- высокая работа разрушения.

Направления практического применения исследованных эффектов могут быть следующими:

- снижение расхода пластификатора на 50 – 60% без ущерба для показателей удобоукладываемости цементной смеси;
- увеличение прочности бетона за счет снижения В/Ц на 15-20%, которое можно использовать для:
  - а) снижения расхода цемента на 20 – 25 %;
  - б) уменьшения толщины конструктивных элементов.

Экономическая выгода при использовании нанобетона не отражается в стоимости самого бетона (цена (рыночная) легкого нанобетона 20 тыс.рублей/куб.м , что в пять раз больше, чем для рядового В25). Она определяется из стоимости всего сооружения в целом. Уменьшение стоимости происходит за счет толщины и веса конструкций (снижение нагрузки на фундамент), расхода цемента.

В настоящей работе рассматривается возможность применения легкого нанобетона в преднапряженных монолитных перекрытиях. Выбор этого материала для изучения основан на том, что нанобетон легкий применяется в промышленно-гражданском строительстве, в том числе в перекрытиях зданий. Для устройства постнапряженных ж/б конструкций обычно применяется высокопрочный бетон с прочностью 35 МПа, 45 МПа. Нанобетон легкий имеет прочность 30-60 МПа. Таким образом, он по своим характеристикам наиболее соответствует поставленным задачам.

Монолитный железобетон широко применяется при возведении объектов гражданского, промышленного, транспортного и специального назначения. Использование армирования обеспечивает повышение прочности конструкции, но остается проблема низкой трещиностойкости бетона при его растяжении. Чтобы скомпенсировать возникающее в процессе эксплуатации растяжение, необходимо создать в железобетоне усилие сжатия, при этом знак напряжения в бетоне будет противоположен знаку напряжения от эксплуатационной нагрузки. Требуемое напряжение обеспечивается передачей усилия натяжения арматурных элементов. Растянутый почти до разрыва арматурный элемент железобетонной конструкции будет стремиться вернуться в первоначальное состояние, т.е. сжаться, тем самым, создавая усилие обжатия бетона в растянутой зоне.

Наиболее эффективным является размещение каната в конструкции по эпюре изгибающих моментов.

У истоков этой концепции стояли Эжен Фрейссине (Франция) и Виктор Васильевич Михайлов (Россия), который в 1936 году защитил посвященную этому методу диссертацию.

На данный момент в России сертифицирована и успешно применяется система предварительного напряжения без сцепления каната с бетоном.

Суть метода заключается в том, что в процессе арматурных работ между верхней и нижней сеткой арматуры выкладывается арматурный канат в оболочке, фиксируемый в криволинейном положении в соответствии с эпюрой изгибающих моментов.

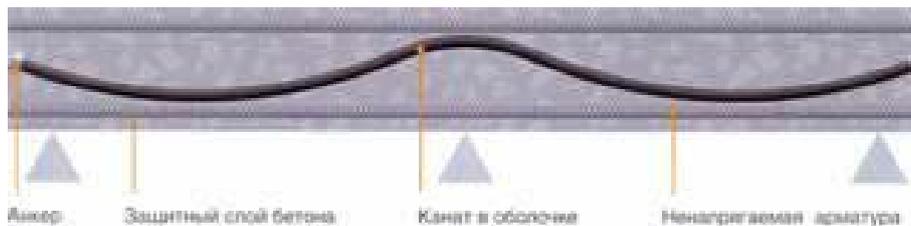
Основным элементом системы является арматурный семипроволочный канат диаметром от 12 до 15.7 мм. Канат в заводских условиях заключается в пластиковую оболочку с прослойкой смазочного состава.

Канатная арматура поставляется, как правило, в бухтах весом 2,5-3 т. Такой канат в оболочке получил в нашей стране и за рубежом наименование «моностренд». В процессе арматурных работ канат размещается в арматурных каркасах и фиксируется по торцам конструкции при помощи анкерных устройств.

После заливки бетона и набора бетоном достаточной прочности производится натяжение каната при помощи гидравлического оборудования.

При проектировании преднапряженных конструкций с системой преднапряжения без сцепления с бетоном следует руководствоваться следующим принципом: преднапряженная арматура передает усилия на бетон не по всей длине, а только в местах анкеровки на торцах конструкции, а также в местах перегиба канатов. Соответственно, преднапряжение должно быть принято в расчете как приложенные к конструкции внешние силы. Силы, возникающие в местах перегиба канатов, зависят, в первую очередь, от геометрии каната и усилий в нем. Как правило, в конструкциях применяется два типа раскладки канатов: свободная

раскладка, при которой фиксируются только анкерные элементы, и фиксированная раскладка, с фиксированием каната на подкладках. При свободной раскладке геометрия каната определяется его жесткостными характеристиками, собственным весом и габаритами конструкции.



**Рисунок 1. Принципиальная схема раскладки канатов в конструкции**

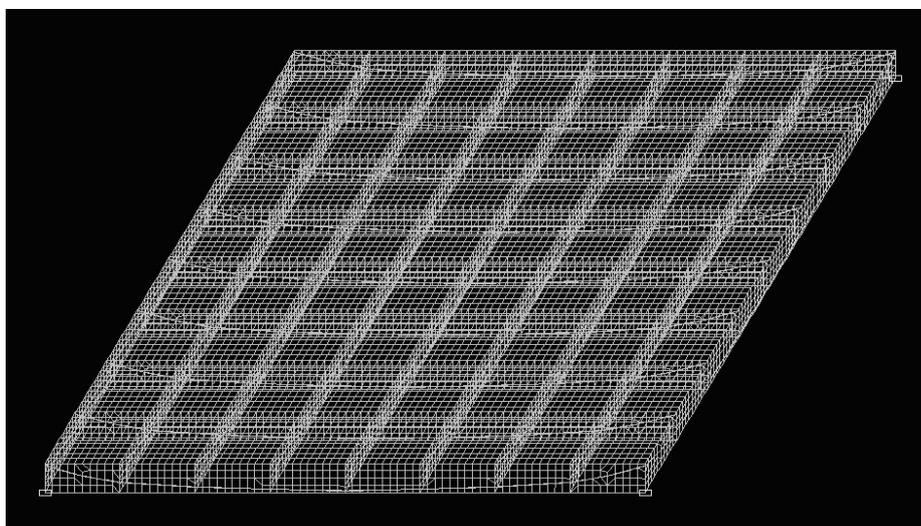
В настоящее время технология преднапряжения применяется практически во всех строящихся зданиях из монолитного железобетона в США и во многих сооружениях в Европе, Японии, Китае и других странах. Причем эта технология применяется в 80% случаев в жилищно-гражданском и дорожном строительстве и лишь в 20% случаев – при строительстве мостов, АЭС и др. уникальных сооружений.

В России в настоящее время систему натяжения на бетон применяет ряд строительных организаций, в т. ч. «DSI-PSK», ЗАО «СТЭФС», ООО «СТС» и др. Она использовалась при строительстве различных сооружений в Москве и Екатеринбурге, однако в большинстве случаев это многоэтажные гаражи или торговые площадки. Поэтому основной задачей в этом направлении является освоение массового применения систем натяжения на бетон без сцепления в жилищно-гражданском и дорожном строительстве из монолитного железобетона. При этом рассматривается применение преднапряжения без сцепления (ПБС) в плитных конструкциях, начиная с фундаментных плит и заканчивая плитами перекрытий многоэтажных зданий, дорожными и аэродромными плитами.

Анализ имеющихся статей и публикаций по этой теме [2, 7, 8, 9] показывает, что результатов по исследованию постнапряженных монолитных перекрытий недостаточно.

Для изучения работы постнапряженных монолитных перекрытий используем метод конечных элементов. Методика расчета данных конструкций изложена в магистерской диссертации И.С. Дзюбы «Монолитное большепролетное ребристое перекрытие с постнапряжением». Работа посвящена актуальной задаче исследования конструкций с использованием постнапряжения арматуры. Была разработана модель и методика составления расчетной схемы такой конструкции, произведено исследование ее поведения на действие постоянных и временных нагрузок. Данная методика конечно-элементного моделирования и расчета постнапряженной конструкции заключается в моделировании ребра плиты оболочечными элементами, а стренда — стержневыми элементами, связанными с узлами оболочки связями конечной жесткости. При этом натяжение стренда моделируется температурной нагрузкой на стержень.

Воспользуемся ранее созданной моделью монолитного ребристого перекрытия с постнапряжением, пролет которого 16x16м. Составными частями конструкции являются: монолитные продольные и поперечные балки сечением 800x120 мм с шагом 2 м, в которых располагается напрягаемый стренд, верхняя плита 120 мм. В работе представлена разработка расчетной модели конструкции перекрытия (рис. 2). Расчет был произведен при помощи программы SCAD путем приложения к расчетной схеме внешней нагрузки [2].



**Рисунок 2. Общий вид расчетной модели перекрытия**

Метод расчета данной задачи и метод моделирования конструкции изложен в [2].

Типы элементов, используемых при расчете в ПК SCAD:

- стержневые элементы – тип 5;
- оболочечные элементы – тип 44;
- специальные элементы (связи конечной жесткости) – тип 55.
- Нагрузки и воздействие в расчетной схеме:
- авто собственный вес конструкций;
- температурная;
- полезная нагрузка.

Для задания собственного веса конструкции были взяты следующие характеристики материала:

- марка бетона В40; модуль упругости  $3,06 \cdot 10^{-6}$  т/м<sup>2</sup> объемный вес 2,5 т/м<sup>3</sup>
- марка «Нанобетона легкого» В35; модуль упругости  $3,31 \cdot 10^6$  т/м<sup>2</sup> (величина модуля упругости взята условно, данная характеристика подлежит уточнению в процессе дальнейшего исследования нанобетонов) и объемный вес 1,6 т/м<sup>3</sup>.

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, оболочек и связей конечной жесткости), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам [2].

Зависимость прогиба перекрытия от изменения полезной нагрузки  $f(P)$   
при  $T=-200$   
при линейном расчете

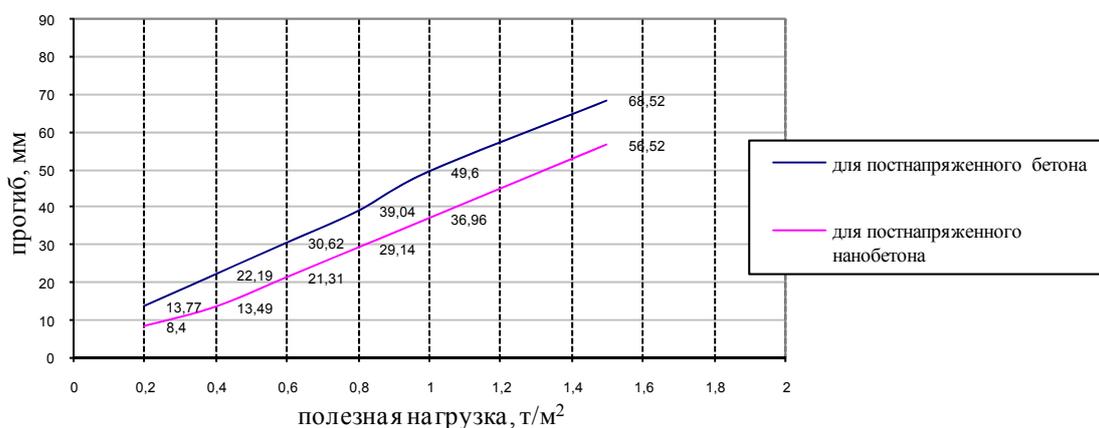


Рисунок 3

Сила натяжения стренда 35т, что моделируется воздействием отрицательной температуры на стержень, равной  $T=-200^{\circ}\text{C}$ .

Были получены зависимости: вертикального прогиба конструкции от действия нагрузки, вертикального прогиба конструкции от усилия в стрендах, выпор перекрытия от усилия в стрендах.

Согласно п. 10.7 СНиП «Нагрузки и воздействия» [10], устанавливающего предельные прогибы и перемещения несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений при расчете по второй группе предельных состояний независимо от применяемых строительных материалов получаем:  $f=16000/230=69,6$  мм – предельный прогиб перекрытия (для промышленного здания).

Исследование модели показывает, что картины деформации перекрытия соответствуют общеизвестным теоретическим данным о работе таких конструкций. Результаты, полученные при линейном расчете (рис. 3): прогиб в рамках допустимого еще при нагрузке  $P=1,5\text{т/м}^2$  для постнатянутого бетона и составляет 68,52 мм, в то время как для постнатянутого нанобетона 56,52 мм.

На основании данных, полученных при расчете рассмотренной конструкции, сделан следующий вывод: более эффективным для преднапряженных монолитных перекрытий является использование «Бетона

наноструктурированного легкого», так как значение прогиба таких конструкций существенно меньше по сравнению с изделиями из традиционных цементных бетонов.

Экспериментальные работы по наноструктурированию строительных композиций при разработке армированных конструкций открывают перспективы создания новых легких и надежных изделий для предприятий строительного комплекса.

### Литература

1. Юдович М.Е., Пономарев А.Н. Регулирование свойств пластичности и прочностных характеристик литых бетонов // Строительные материалы, № 1/2007.
2. Дзюба И.С., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Монолитное большепролетное ребристое перекрытие с постнапряжением. Технология и конструкции. СПб., 2008.
3. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. 1. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // Строительные материалы, № 6/2007.
4. Пономарев А.Н. Технично-экономические аспекты и результаты практической модификации конструкционных материалов микродобавками нанодисперсных фуллероидных модификаторов // Вопросы материаловедения, №3(35)/2003.
5. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М., 1990.
6. Мадатян С.А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне // Технологии бетонов, № 3/2006.
7. Черныгов Е.А. Исследование эффективности применения технологии натяжения арматуры на бетон без сцепления // Молодые ученые в транспортной науке. Научные труды ОАО ЦНИИС. М., 2005.
8. Лихов З.Р. Совершенствование преднапряженных железобетонных стропильных балок и методов их расчета : Дис. Канд. Техн. Наук : 05.23.01 Ростов н/Д, 2004.
9. Осипов М.В. Железобетонные балки с переменным преднапряжением вдоль арматурных стержней: Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Ростов н/Д, 2005.
10. СНИП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия».
11. Гранквист Р.В. Будущее строится сегодня // Буклет ЛенСпецСМУ. СПб, 2003.
12. [Http://www.nanotech.ru/index.html](http://www.nanotech.ru/index.html)

*\*Евгения Викторовна Кишинеvская,*

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

*Тел. моб. +79043329705;*

*Эл. почта [janeva2004@mail.ru](mailto:janeva2004@mail.ru)*