



УДК 624.012

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ И  
НАПРЯГАЮЩИХ ВЯЖУЩИХ, БЕТОНОВ И КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ  
ОСНОВЕ – ОДНО ИЗ ВАЖНЕЙШИХ НАПРАВЛЕНИЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОФ. В.В. МИХАЙЛОВА**

*Звездов А.И., Будагянц Л.И., Мартиросов Г.М.*

*НИИЖБ, г. Москва*

Среди широкого круга научных проблем в области капитального строительства разработка и исследование расширяющихся и напрягающих вяжущих и их применение занимали в деятельности В.В. Михайлова и руководимой им лаборатории одно из важнейших мест.

Предпосылки создания вяжущего, способного устранить присущий обычным бетонам такой недостаток, как усадка, были показаны им ещё в 1941 г. в монографии «Элементы теории структуры бетона» и реализованы разработкой и освоением производства водонепроницаемого расширяющегося цемента ВРЦ; нашедшего применение в восстановительных, ремонтных работах, метростроении и других областях строительства.

Прочностной основой, а также базой для расширения цементного камня ВРЦ являлись алюминаты и сульфаты кальция, что обеспечивало быстрый набор прочности и расширение в ранние сроки.

Успехи в разработке, освоении производства и практическом применении ВРЦ побудили В.В. Михайлова к созданию более массового и экономичного расширяющегося вяжущего на основе портландцемента, получившего впо-

*Звездов А.И.* – д.т.н., профессор, НИИЖБ Госстроя РФ, г. Москва

*Будагянц Л.И.* – к.т.н., с.н.с., НИИЖБ Госстроя РФ, г. Москва

*Мартиросов Г.М.* – к.т.н., с.н.с., НИИЖБ Госстроя РФ, г. Москва

следствии название напрягающего цемента, благодаря способности получать напряжения сжатия при ограничении его расширения с помощью арматуры, упоров или иным способом.

Процесс расширения НЦ также основан на взаимодействии алюминатов кальция портландцемента и дополнительно вводимого глинозёмистого шлака с гипсом в среде гидратирующихся силикатов кальция портландцемента с химическим связыванием повышенного количества влаги в процессе твердения.

Способность НЦ и бетона на его основе развивать в процессе расширения давление на ограничивающие связи, получая при этом собственное обжатие, называемое самоупругиванием, привела к созданию нового вида преднапряженных конструкций — самоупругиванных, в которых напряжение арматуры происходит благодаря её сцеплению с бетоном за счет энергии расширения НЦ.

Первые составы НЦ, на которые в 1953 г. В.В. Михайловым совместно с С.Л. Литвером и А.Н. Поповым было получено авторское свидетельство, твердели и расширялись в условиях обязательной тепловлажной обработки при температуре 70..100 °С в течение 2..6 час.

Проведенные впоследствии в лаборатории С.Л. Литвером и Л.И. Будагянцем исследования позволили получить разновидность НЦ нормального твердения, т.е. не требующую в процессе твердения обязательную тепловую обработку. В обоих случаях для полного протекания процессов расширения и самоупругивания необходим избыток влаги, т.е. увлажнение или хранение в воде в первый период твердения после предварительного набора прочности.

В процессе изучения НЦ наряду с такими характеристиками как прочность, свободное расширение и другие, очень важно было оценить также и самоупругивание, чтобы на основе этого определить обжатие бетона и напряжение в арматуре, т.е. самоупругивание или самоупругивание конструкции в целом. Вначале для лабораторных исследований были разработаны и изготовлены стационарные рычажные приборы с образцовым динамометром для определения усилия расширения — ПУРЫ; создавали установленному в них образцу-призме упругое сопротивление расширению, эквивалентное содержанию продольной арматуры, варьируемое в пределах — 0,2+5,0 %, и были рассчитаны на потенциально достижимое самоупругивание до 10 МПа. Кроме того, образец устанавливался в стакан со спиралью для создания заданного температурно-влажностного режима.

Это позволило также экспериментально найти зависимость самоупругивания от коэффициента продольного армирования, а в дальнейшем, приняв в

качестве стандарта для определения марки по самоупрежению напрягающих цемента и бетона коэффициент армирования, равный 1,0 %, установить для этого, а также для расчёта деформаций самоупрежения железобетонных конструкций на основе НЦ экспериментально-теоретические зависимости, включенные затем в нормы по проектированию самоупреженных конструкций.

Первое производство и применение НЦ в условиях промышленного строительства осуществлялось под руководством и при участии сотрудников лаборатории В.В.Михайлова с 1965 г. на Нижне-Тагильском ЖБК №2 – НЦТ (с тепловой обработкой) – для изготовления центрифугированных самоупреженных труб диаметром 500 мм и Управлением строительства “Сибкадемстрой” – НЦН (нормального твердения) – для возведения технологических емкостей системы водоснабжения г. Новосибирска (объёмом только 1-й очереди – более 100 тыс. м<sup>3</sup> сборных железобетонных резервуаров, отстойников, фильтров и др.).

Водонепроницаемость емкостей обеспечивалась замоноличиванием стыков цементно-песчаными составами на НЦ, который, расширяясь в процессе твердения, создавал распор и преднапряжение арматурных выпусков в стыке, что существенно повышало его трещиностойкость.

Такой стык получил название самоупреженного, благодаря высокой водонепроницаемости составов на НЦ даже в подвижных смесях, обеспечивалось качественное заполнение стыка, что особенно важно при стесненных условиях бетонирования.

В обоих случаях изготовление НЦ производилось совместным помолотом портландцемента с заранее подобранным количеством гипса и глиноземистого цемента. Контроль самоупрежения на ЖБК-2 велся с помощью ПУРов, в “Сибкадемстрое” – с использованием специально разработанных динамометрических колец, которые создают отформованному в них образцу-призме 31,5×31,5×95 упругое сопротивление расширению, эквивалентное содержанию продольной арматуры в количестве 1 %.

Первые ТУ на НЦ, включающие требования к НЦ нормального твердения и к НЦ с обязательной тепловой обработкой, были разработаны лабораторией к 1968 году на основе лабораторных исследований и первого практического опыта изготовления НЦ и применения в условиях стройплощадки Новосибирского горводозабора Управлением строительства “Сибкадемстрой”. Одновременно в эти ТУ была включена новая методика контроля марки НЦ по самоупрежению с помощью динамометрических колец.

Кроме того этот опыт был использован при разработке типовых чертежей серии 3.900–2 «Унифицированные сборные железобетонные конструкции

водопроводных и канализационных емкостных сооружений» утвержденных Госстроем СССР в 1968 г. (в части Рекомендаций по замоноличиванию стыков емкостей).

В дальнейшем приобретенный опыт получил развитие в других сооружениях и конструкциях, в том числе в зимних условиях при отрицательных температурах. Возведенный там же в 1968 г. плавательный бассейн "Нептун" со сборно-монокристаллическим днищем за счёт применения бетона на НЦ не имеет специальной гидроизоляции. Все емкостные конструкции эксплуатируются до настоящего времени, не требуя текущих и капитальных ремонтных затрат.

Освоение производства НЦ цементной промышленностью состоялось в 1972 г. на Усть-Каменогорском цементном заводе под руководством и при участии НИИЖБ для строительства железобетонной технологической плиты искусственного ледового поля и конькобежной дорожки стадиона «Медведь» под Алма-Атой. Высокое насыщение плиты трубопроводами для хладоносителя (более 4 %) при выполнении её из обычного бетона на портландцементе неизбежно привело бы к образованию многочисленных трещин от усадки, тем более при резких колебаниях температуры и влажности, характерных для этой местности. Применение бетона на НЦ позволяло не только компенсировать расширением потенциальную усадку, но и получить в конструкции самоуплотнение, исключающее образование трещин и при других внешних воздействиях.

При изготовлении первой опытной партии НЦ оперативно решались вопросы подготовки и дозирования исходных сырьевых материалов — гипсового камня, глиноземистого шлака и портландцементного клинкера, после заранее проведенного в лаборатории завода подбора оптимального состава НЦ на этих материалах. Отработана также методика текущего контроля качества НЦ — тонкость помола, содержание сульфатов, алюминатов при помоле, а также изготовление, твердение, замеры и испытание контрольных образцов с определением расширения, самоуплотнения, прочности при изгибе и сжатии в разном возрасте.

Перед возведением технологической плиты для проверки её ожидаемых расчетных параметров по самоуплотнению, деформативности и трещиностойкости там же была выполнена опытная плита того же сечения длиной 42 м, на которой отработывалась технология отделки поверхности плиты, поскольку к ней предъявлялись весьма высокие требования по качеству.

Анализ конструкции плиты и результатов дополнительных испытаний бетона на конкретной партии НЦ позволил выполнить плиту хоккейного поля длиной 114 м без температурных швов, а дорожку протяженностью 400 м —

только с четырьмя швами (вместо восьми по первоначальному проекту) и те были замоноличены на втором году эксплуатации. Более чем 25-летний опыт безремонтной эксплуатации ледового поля и дорожки в Медео показал высокое качество и надежность охлаждающей плиты из бетона на НЦ при длительном сроке безотказной работы.

На основе опыта Медео был выполнен ряд искусственных ледовых полей и конькобежных дорожек стадионов и Дворцов спорта в Москве, Киеве, Ереване, Барнауле и др. Так технологическую плиту ледового поля Дворца спорта в Лужниках из-за разрушения обычного бетона приходилось менять каждые 6-7 лет, тогда как выполненная в 1978 г. плита из бетона на НЦ успешно эксплуатируется более 20 лет.

Уместно привести и другой пример. В висячей оболочке покрытия шатрового типа диаметром 160 м (гараж на 500 автобусов в г. Киеве, 1972 г.) необходимое предварительное напряжение было обеспечено при замоноличивании конструкции заполнением в определенной последовательности радиальных и кольцевых швов напрягающим бетоном. Каким-либо другим способом создать необходимое преднапряжение этой конструкции, учитывая ее форму и размеры (площадь оболочки 20000 м<sup>2</sup>), практически оказалось не реально. Бетон радиальных швов, кроме самонапряжения конструкции покрытия, благодаря плотной структуре и отсутствию трещин обеспечил благоприятные условия сохранности расположенного в швах каната диаметром 65 мм, определяющего живучесть конструкции.

С началом промышленного производства НЦ в 1972 г. его эффективное применение в разных областях строительства, в том числе в емкостных и подземных сооружениях, существенно расширилось. Особенно активно и творчески подошли к этому вопросу в Усть-Каменогорском тресте "Алтайсвинестрой" (гл. инженер И.Р.Подгорный). Для комплекса очистных сооружений, химкомбината силами треста при участии лаборатории В.В. Михайлова были переработаны типовые проекты технологических емкостей, предусматривающие, в частности, навивку кольцевой напряженной высокопрочной арматуры, на сборные конструкции с самонапряженными стыками, что позволило исключить трудоемкие и сложные технологические переделы навивки арматуры и торкретирования для защиты её от коррозии.

Это позволило существенно упростить процесс строительства и повысить водонепроницаемость емкостей, что дало возможность сократить продолжительность возведения комплекса на год и получить весомый экономический эффект.

Успешная реализация на конкретном объекте новых конструкций емкостей на основе применения НЦ и самонапряженного стыка для обеспечения

их трещиностойкости и водонепроницаемости поставила на повестку дня вопрос о разработке проектов таких конструкций для массового применения в масштабах страны.

Союзводоканалпроект совместно с НИИЖБ (Л.И. Будагянц) разработал экспериментальные проекты типоряда первичных и вторичных цилиндрических отстойников диаметром от 9 до 40 м с самонапряженными стыками без навивки и торкретирования. Пояснительная записка к проектам содержала развернутые рекомендации по технологии производства работ, что позволяло строителям выполнять работы, как правило, самостоятельно. Проекты и были рекомендованы к широкому применению в строительстве на правах типовых, что и было реализовано в различных регионах – в Поволжье, Ставрополье, на Сев. Кавказе и др.

В связи с подготовкой к проведению Олимпиады-80 были реконструированы главные спортивные арены (Лужники, Динамо, Измайлово – в Москве, стадион им.С.М.Кирова – в Ленинграде) и построены плавательные бассейны различных размеров и назначения. Трибуны стадионов, которые одновременно являются эксплуатируемой кровлей для подтрибунных помещений, представляют собой неразрезную ступенчатую самонапряженную плиту, выполняющую функции несущей конструкции и гидроизолирующего ковра. Применение бетона на НЦ позволило обеспечить водонепроницаемость конструкций без использования специальной гидроизоляции. Бетон на НЦ для Москвы поставляло Объединение "Мосстройконструкция".

Успешный опыт освоения изготовления НЦ на Усть-Каменогорском заводе, а также возведения и эксплуатации стадиона Медео вызвал всплеск потребности в НЦ и расширение производства этого вяжущего другими заводами. – Краматорским, Воскресенским, Днепродзержинским, Подольским, Пашийским, Волковским и др. Во всех случаях освоение производства НЦ шло под контролем и при участии сотрудников лаборатории проф. В.В. Михайлова. Годовой объем производства НЦ в начале 90-х годов превысил 1млн. тонн.

Наиболее активный по самонапряжению (марке) НЦ выпускали Усть-Каменогорский и Днепродзержинский заводы (НЦ-20, НЦ-40), остальные в основном – НЦ-20. При этом марка НЦ по прочности составляла 40, чаще 50 МПа.

В дальнейшем для контроля самонапряжения НЦ (в растворе 1:1) и бетона на его основе были разработаны динамометрические кондукторы трёх типоразмеров - для образцов 40×40×160, 50×50×200 и 100×100×400 мм, также оказывающие отформованным в них образцам сопротивление расширению эквивалентное армированию 1%, а также позволяющие после заверше-

ния процесса самоупрочнения, освобождать образец и проводить его стандартные испытания по действующим нормам (на прочность, деформативность, ползучесть и т. п.).

Это позволило расширить круг исследований НЦ различной активности от НЦ-10 до НЦ-60 в бетонах различного состава, включая влияние расхода цемента (от 400 до 700 кг/м<sup>3</sup>) и заполнителя на самоупрочнение. Были разработаны зависимости для подбора состава напрягающего бетона, исходя из марок НЦ по прочности и самоупрочнению, и других факторов, для получения заданных проектом характеристик бетона при необходимой удобоукладываемости бетонной смеси, которые были специальным разделом включены в «Рекомендации по подбору состава тяжелого бетона», НИИЖБ, 1979 г.

Комплекс проведенных исследований показал также не только высокую водонепроницаемость, но и повышенную прочность напрягающего бетона на осевое растяжение и при изгибе, что дало основание включить в нормы повышающий коэффициент 1,2 к его прочности на осевое растяжение по отношению к прочности обычного бетона.

Освоение производства НЦ цементной промышленностью привело к необходимости разработки нормативной документации для проектирования широкого круга конструкций и сооружений. На базе частных рекомендаций лаборатории по расчёту и проектированию конструкций из бетона на НЦ и полученного совместно с проектными организациями (Сибкадемпроект, Союзводоканалпроект, Алтайсвинецстрой, Метрогипротранс, Алма-АтаГипрогор, Моспроект, Мосинжпроект и др.) опыта их проектирования, В.В. Михайловым и Л.И. Будагянцем была разработана «Инструкция по проектированию самоупрочненных железобетонных конструкций» СН-511-78.

В Инструкции впервые в практике были даны правила и методика расчёта напряженного состояния и деформаций железобетонных конструкций в результате расширения бетона на НЦ совместно с находящейся в нём и растягиваемой при этом арматурой, т.е. предварительного напряжения или самоупрочнения конструкции в целом. Дальнейший расчет конструкции на действие нагрузок и других факторов производится с учётом специфики самоупрочнения как обычной преднапряженной.

При разработке нового СНиП 2.03.01-84 в него впервые был включён напрягающий бетон и технические требования к нему, включая новую характеристику бетона - марку по самоупрочнению и самоупрочнение как особый вид напряженного состояния. Одновременно на основе Инструкции 511-78 с учётом новых данных к этому СНиП было разработано в 1986 г. более детальное Пособие по проектированию самоупрочненных железобетонных

конструкций. Наряду с самоупрежением важнейшей характеристикой напругающего бетона является его высокая водонепроницаемость - марка W 12, что позволяет выполнять самоупреженные конструкции без специальной гидроизоляции.

Было также разработано Пособие по производству сборных самоупреженных железобетонных конструкций и изделий к СНиП 3.09.01-85 с целью конкретизации требований по заводскому производству сборных конструкций и изделий, изготовляемых из бетона на напругающем цементе. В Пособии отражены особенности приготовления бетонных смесей, формования, тепловлажностной обработки, хранения и контроля качества изделий из бетона на НЦ.

Были разработаны десятки рекомендательных документов - как достаточно обобщенных, например, «Рекомендации по применению бетонов на напругающем цементе в монолитном и сборно-монолитном строительстве», так и по конкретным областям строительства, например, «Рекомендации по проектированию и возведению емкостных конструкций с применением бетона на напругающем цементе», «Рекомендации по изготовлению железобетонных самоупреженных низконапорных труб», «Рекомендации по применению напругающего цемента для гидроизоляции стыков сборных обделок тоннелей метрополитенов», «Рекомендации по применению напругающего бетона для покрытий полов и кровель».

В последнее время получило распространение получение НЦ и бетона на его основе путем использования расширяющей добавки (РД), обычно на базе сульфатов и алюминатов кальция, вводимой в бетонную смесь на портландцементе непосредственно в процессе приготовления бетона.

Первое использование НЦ на базе РД состоялось при возведении бака водонапорной башни в г. Ауце (Латвия) в январе 1972 г., когда производство НЦ ещё не было освоено цементной промышленностью. Применение РД позволяет уменьшить транспортные расходы, поскольку её расход не превышает, как правило, 10-20% от массы НЦ, марка которого по самоупрежению при этом составляет обычно НЦ-10 - НЦ-20, что вполне достаточно для получения бетонов с компенсированной усадкой.

На территории Б. Советского Союза из бетона на НЦ возведено миллионы кубических метров конструкций зданий и сооружений, при этом срок их безремонтной эксплуатации в 3.6 раз больше, чем у аналогов на обычном бетоне.

Из числа наиболее крупных московских объектов трех последних лет, на строительстве которых применен НЦ, можно назвать Старый Гостиный Двор, Аквадром, здание МИД РФ, торгово-общественный комплекс на пл. Курского вокзала.