

Г. И. МАКАРОВ, к. т. н., заведующий лабораторией;  
 М. В. ПАСКОВ, ведущий инженер  
 (Лаборатория геомассивов, оснований и фундаментов опор мостов филиала АО «ЦНИИС»  
 НИЦ «Мосты»);  
 Е. И. ПАВЛОВ, к. т. н., технический директор  
 (ООО «НПЦ «Бау-Мониторинг»)  
 М. ВИКУЛОВ

## МОНИТОРИНГ ВОЗВЕДЕНИЯ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ЭСТАКАДЫ В АЭРОПОРТУ ДОМОДЕДОВО

В публикуемой статье впервые рассматриваются вопросы мониторинга предварительного натяжения пролетных строений эстакады (мостовых конструкций) в построчных условиях. Было проведено наблюдение за температурным режимом твердения бетона с помощью термопар и предварительного натяжения бетона датчиками деформаций. Схема установки приборов утверждалась проектной организацией. Результаты измерений передавались заказчику и проектировщику для оценки предварительного натяжения. Мониторинг осуществлялся при возведении пролетных строений притерминальной эстакады аэропорта Домодедово.



Общий вид эстакады

Автомобильная эстакада была запроектирована над съездом №2 притерминальной транспортной развязки. Проектирование выполнено в соответствии с требованиями СП 35.13330.2011.

Строительство эстакады запроектировано с учетом следующих осложняющих факторов: необходимость сохранять подъезд к действующим и вводимым в эксплуатацию терминалам аэропорта; расположение съезда №2 непосредственно под эстакадой; стесненность условий, связанная с расположением эстакады между частью существующей притерминальной площади и проектируемыми терминалами, надземными паркингами, железнодорожной станцией «Аэроэкспресс».

Учитывая расположение эстакады на съезде №1, состоящем из прямых участков, круговых и переходных кривых в сочетании с виражами на поворотах и изменением ширины эстакады, пролетные строения предусмотрены из монолитного железобетона с преднапряженным армированием высокопрочной арматурой.

Промежуточные опоры эстакады запроектированы с отдельными свайными ростверками под каждую точку опирания пролетного строения. Устои — в виде подпорных стен из объединенных ригелем буронабивных свай.

Пролетные строения — балочные из монолитного преднапряженного железобетона. Эстакада состоит из 11 секций по основному ходу и 4 отдельных секций для связи с паркингами.

Схема пролетного строения основного хода —  $(20+30+30+14,92)+(14,66+25+25+25+15)+(24,98+24,62+30+29,95)+(10+10,3+10,3+10)+(22,9+30+27+20)+(21,5+30+25+21+30+21)+(29,59+30)+(16,07+30+14,84)+(25,03+30+25+22+15,58)+(25+30+21,09+30+25)+(20,86+27+28)$  м. На нем устраивается 6 полос движения. На промежуточном этапе у терминала Т1 для обеспечения зоны высадки пассажиров предусмотрена дополнительная 7-я полоса. У начала и конца эстакады, где отсутствуют зоны высадки, — 4 полосы. Для въезда в паркинг РМ-3 и выезда из РМ-2 устраивается 4 полосы по 2,5 м, для выезда из РМ-3 и въезда РМ-2 предусмотрены 2 полосы по 2,5 м.

Пролетные строения, запроектированные под временные нагрузки А14 и Н14 по ГОСТ52748-2007, в профиле расположены в основной части на горизонтальной прямой, в начале и конце эстакады — на выпуклых кривых. Имеются прямолинейные участки вдоль терминалов, а также в начале и конце эстакады, и криволинейные в местах сопряжения терминалов.

Пролетное строение эстакады по основному ходу представляет собой плитно-ребристую конструкцию, состоящую из пяти главных балок таврового сечения. Для устройства дополнительной полосы у терминала Т-1 предусмотрено устройство шестой балки. Главные балки имеют переменное сечение с высотой в пролете 0,9 м, а над опорой — 2 м. Над опорами предусмотрено устройство скрытых ригелей высотой 2 и 1,5 м на границах плетей. Толщина плиты пролетного строения составляет 0,25 м. Главные балки и скрытые ригели после омоноличивания преднапрягаются. Арматурные пучки состоят из 19 арматурных канатов К7 диаметром 15,2 мм по ГОСТ Р 53772-2010 и EN 10138-3. Для конструкций пролетных строений применяется конструкционный тяжелый бетон В45 W8 F300.

Работы по преднапряжению проводились в две стадии с предварительной фиксацией усилия условного нуля на 20% от проектного усилия: первая стадия — натяжение на 30% от проектного усилия, вторая — натяжение на 100%.

Натяжение пучков по каждой стадии в соответствии с рабочей документацией происходило в пять этапов в строго оговоренной последовательности. Соблюдение ее в ходе натяжения главных балок и ригелей позволило предотвратить трещины в конструкции из-за разности деформаций соседних элементов.

В связи со сложной схемой натяжения конструкции пролетного строения, требованиями п. 5.96 СП35.13330.2011 и п. 9.96 СП46.13330.2012 предусмотрен мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкции и температурного режима твердения бетона пролетного строения в процессе строительства.

После возведения конструкции опор и установки опорных частей, устройства сплошных подмостей и опалубки с последующим устройством неперенапряженного армирования и установкой в проектное положение системы преднапряженного армирования производилось бетонирование пролетного строения по специально разработанному технологическому регламенту.

Длина пролетных строений составляла от 50 до 120 м, ширина — от 15 до 30 м.

При измерении температуры твердеющего бетона применялись приборы «Терем 3.2», работающие вместе с термопарами.

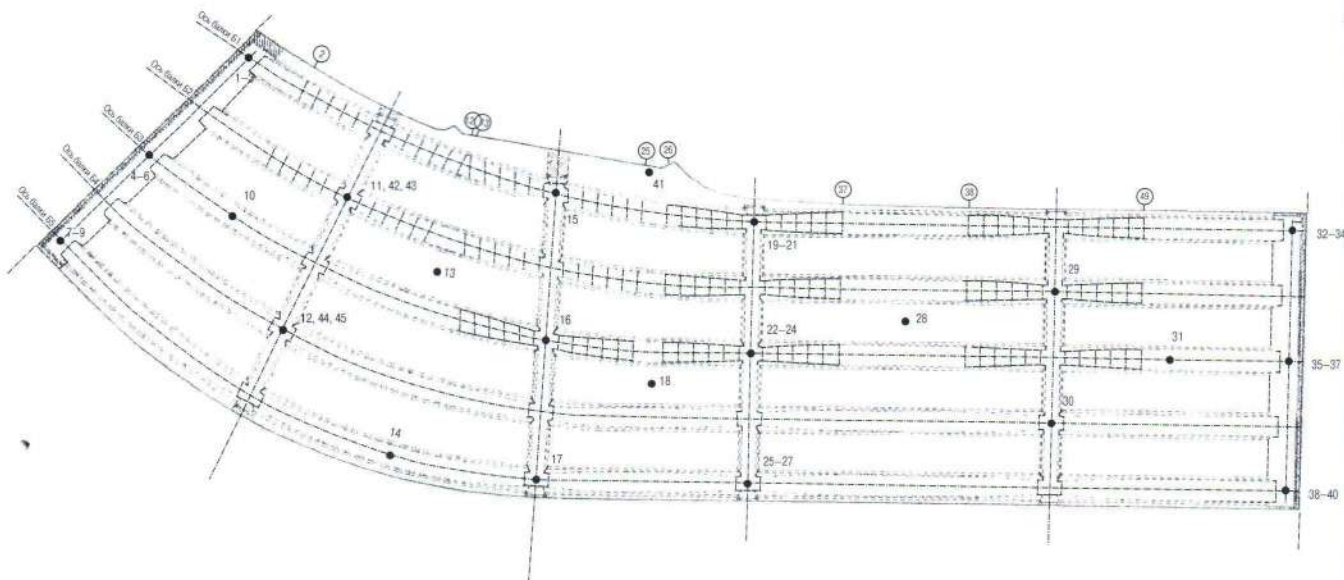
Рассмотрим один из участков между опорами 30 и 35. Общая его длина — около 117,4 м, ширина — 27,9 м. Пролетное строение состоит из 6 скрытых ригелей и 5 продольных балок.

Термопары представляют собой двужильный провод ПТВВ-ХК 2х1 определенной (необходимой) длины, который зачищается с обоих концов. Далее с одной стороны производится их скрутка и пайка (этот конец опускается в заданную точку), другой конец присоединяется к модулю. Процедуры по подготовке и проверке термопар проводились в лабораторном корпусе сотрудниками нашей лаборатории.

На указанном пролетном строении замер температуры твердеющего бетона осуществлялся в 45 точках (45 термопар) каждые 4 часа в течение 7 суток с момента начала бетонирования. Схема установки приборов была согласована проектной организацией (рис. 1).

Работы по мониторингу деформаций при натяжении арматурных канатов проводились совместно с ООО «Бау-Мониторинг».

Были задействованы кварцевые деформометры ДК 200, которые разработаны совместно с Институтом физики Земли РАН. Эти приборы предназначены для фундаментальных исследований. У них практически отсутствует температурный дрейф. Благодаря этому можно получать два вида результатов, с температурной компенсацией и без нее, причем задавая любой требуемый коэффициент температурного расширения. База измерения составляет 200 мм (рис. 4).



Номера термомпар и глубина установки датчиков по сечению

- 1, 4, 7, 13, 18, 19, 22, 25, 28, 32, 35, 38, 41 – 10 см
- 10, 14, 31 – 45 см
- 2, 5, 8, 33, 36, 39 – 75 см
- 11, 12, 15, 16, 17, 20, 23, 26, 29, 30, 42, 44 – 100 см
- 3, 6, 9, 34, 37, 40 – 140 см
- 21, 24, 27, 43, 45 – 190 см

Рис. 1. Схема установки термомпар на пролетном строении от оп. 30 до оп. 35

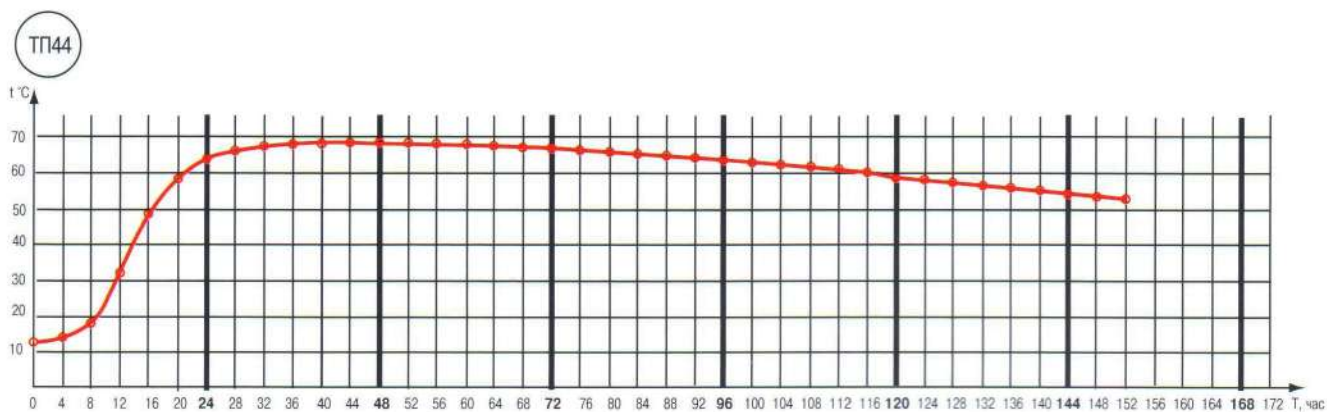


Рис. 2. Вид графика температуры в зависимости от времени

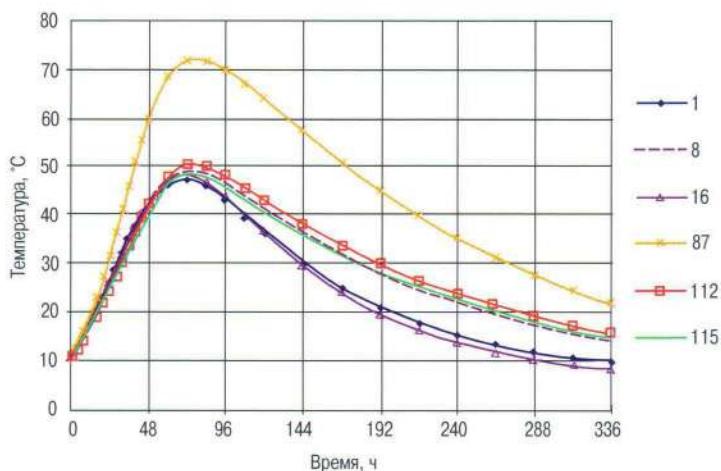


Рис. 3. График изменения температуры по технологическому регламенту



Рис. 4. Общий вид прибора ДК 200

Прибор крепится к поверхности бетона с помощью саморезов и закрывается пластиковым ящиком, который гарантирует защиту от механических повреждений. Все деформометры с помощью кабеля соединяются между собой в цепь и подключаются к адаптеру, который производит запись данных. Также реализована возможность просмотра результатов в реальном времени с компьютера при помощи специальной программы.

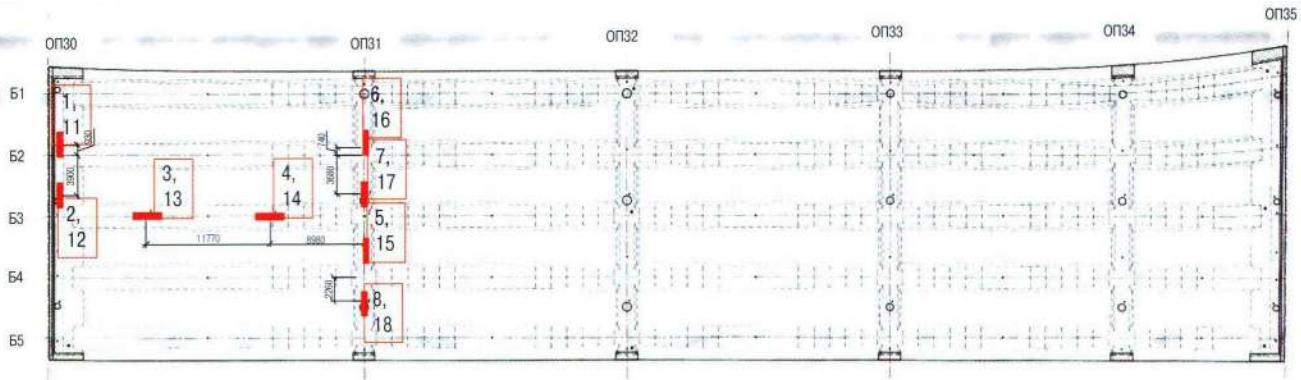


Рис. 5. Схема установки деформометров (ДК 200)

Полученная информация представлялась в графиках, а также в виде таблицы с максимальными значениями.

На неразрезной части ПС с опорами 30–35 установили 16 деформометров ДК 200, 8 сверху и 8 снизу (один под другим). Всего было 11 этапов натяжения. Сначала каждая балка напрягалась на 30%, затем на 100%. Схема установки датчиков представлена на рис. 5.

Результаты передавались в режиме «онлайн» на компьютеры непосредственно проектной организации для принятия оперативных решений в процессе преднапряжения пролетного строения. Это позволяло своевременно вносить корректировки. Графики, полученные в процессе преднапряжения, представлены на рис. 6.

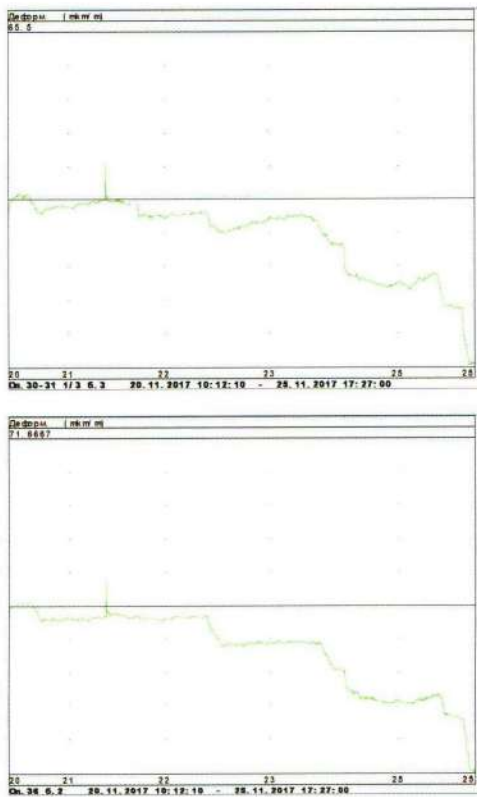


Рис. 6. График распределения относительных деформаций: а — при натяжении высокопрочной арматуры. Датчик №4, б — при натяжении высокопрочной арматуры. Датчик №14

После анализа соответствующих графиков был произведен сравнительный анализ с данными, полученными при расчете пролетного строения. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1.  
Результаты сравнительного анализа

№ датчика	Усилие 100% от проектного		
	Относительные деформации фактические, мкм/м (26.11.2017)	Относительные деформации по расчету, мкм/м	Относительная разница, %
1	-160,0	-94,7	+40,81
11	-149,0	-117,6	+21,07
2	-119,5	-112,0	+6,27
12	-148,0	-97,6	+34,05
3	-133,0	-85,3	+35,86
13	-100,5	-455,2	-0,99
4	-147,0	-264,3	-44,38
14	-138,0	-176,9	-22
5	-222,0	-187,6	+15,5
15	-111,5	-47,5	+57,4
6	-202,0	-59,6	+70,5
16	-147,5	-151,5	-2,64
7	-169,0	-92,5	+45,27
17	-204,5	-67,6	+66,94
8	-105,5	-89,5	+15,16
18	-42,0	-58,7	-28,45

Значительная разница в результатах обусловлена сложной работой конструкции пролетного строения в процессе создания предварительного напряжения на сплошных подмостях.

Несмотря на расхождения, мониторинг напряженно-деформированного состояния сооружения в процессе создания предварительного напряжения позволяет оценить правильность работы конструкции на каждом этапе по общей картине распределения деформаций.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов мониторинга измерения температуры твердеющего бетона показал следующее:

- при производстве работ бетонная смесь поступала на объект с температурой  $+12-15^{\circ}\text{C}$ , а наружная температура бетона (в тепловом контуре) составляла  $+20-25^{\circ}\text{C}$ ; также в соответствии с СП 70.13330.2012 выполнялся тепловлажностный уход за бетоном;

- по фактическим данным из графиков внутренняя температура бетона составила: в центральных точках (на глубине 1 и 0,75 м) —  $+60-70^{\circ}\text{C}$ , в нижних (на глубине 1,4 и 1,9 м) —  $+55-58^{\circ}\text{C}$ , в верхних (на глубине 0,1 и 0,45 м) —  $+50-63^{\circ}\text{C}$  на первые сутки;

- твердение бетона соответствует проектным значениям с ускоренным набором прочности из-за дополнительного температурно-влажностного ухода.

2. Преимущества использования оборудования:

- меньшие трудозатраты, хотя и необходимо проводить подготовку по нарезке и проверке термопар в лаборатории; на объекте происходит прокладка провода и подключение к прибору, далее запись ведется в автоматическом режиме без присутствия специалиста на стройплощадке; при необходимости всегда можно включить прибор и посмотреть температуру, как в данный момент, так и за прошедшее время;

- при использовании термоскважин необходимо подготавливать трубки, спиртосодержащие вещества, термометры, постоянно находиться на строительной площадке для фиксации температуры, подливать жидкость, которая испаряется; чтобы измерить температуру на разной глубине, нужно изготавливать несколько трубок разной длины; до момента твердения бетона к ним нет доступа, в то время как прибор «Терем» находится в удобном месте.

3. Получены более точные данные, так как термопары находились в непосредственном контакте с бетоном. Получение информации в электронном виде при этом ускоряет ее обработку.

4. При натяжении продольной арматуры сжатие должно быть больше в нижнем поясе балок. Однако в реальности так не получилось. В месте установки 3-го датчика балка больше, чем по расчету, выгнулась вверх, а в месте установки 4-го — вниз. В месте установки 3-го датчика вся площадь плиты, в сравнении с 4-м, сжата в 2,6 раз больше, а внизу в месте установки 13-го — в 3 раза больше. Проблема может лежать в плоскости неразрезного пролетного строения, которое опирается на РОЧи — и они начинают воспри-

нимать его нагрузки. Осадка опор также имеет место. То есть должно быть дополнительное растяжение на 14-м датчике (меньшие деформации сжатия), а на 4-м должны быть больше деформации сжатия, что в действительности мы и наблюдаем. Возможно, что это не все факторы, так как перекося значительны. Может быть и неравномерное распределение модуля упругости бетона, поскольку бетонирование такого объема представляет значительную сложность. В данный момент проводится более детальный анализ данного вопроса.

5. При натяжении арматуры во всех точках измерений регистрировалось сжатие. Исключением был датчик №6, где в конце натяжения образовалось небольшое растяжение, около 46 мкм/м. Причем прибор находился между стойками опор ригеля, и это небольшое растяжение исчезнет под весом полотна проезжей части. Напротив, нижний датчик №16 показывал сжатие 318 мкм/м. Это значение является максимальным для ригелей. Датчик №11, установленный в том же месте на 30-м ригеле, показал сжатие 256 мкм/м, а симметричный ему №1 — 174 мкм/м. Ригели имеют разную конструкцию и не будут работать одинаково, но наиболее нагруженный ригель (31) имеет более благоприятное распределение напряжений для восприятия нагрузки.

5. Влияние температуры. Для иллюстрации этого явления интересно рассмотреть показания датчика №18. Если взять термокомпенсированную версию показаний, то видно, что поверхностный слой бетона испытывал растяжение. Но если построить график абсолютных деформаций, то видно, что он работал в соответствии с порядком натяжения арматуры, то есть строго. Пример дает представление, насколько неравномерно распределены напряжения по сечению элементов железобетонной конструкции.

6. С помощью приборов ДК 200 возможно проводить мониторинг в разных точках конструкции. Передача данных в реальном времени позволяет 24 часа наблюдать реальную картину на объекте и оперативно сопоставлять результаты с расчетными величинами.

Данные, полученные при мониторинге, позволяют анализировать причины возникновения растяжения, которые свидетельствуют о неравномерной работе конструкции при преднапряжении.

В настоящий момент совместно с проектной организацией проводится детальный анализ по результатам мониторинга с целью выявления дефектов конструкции и улучшения качества работ. ■