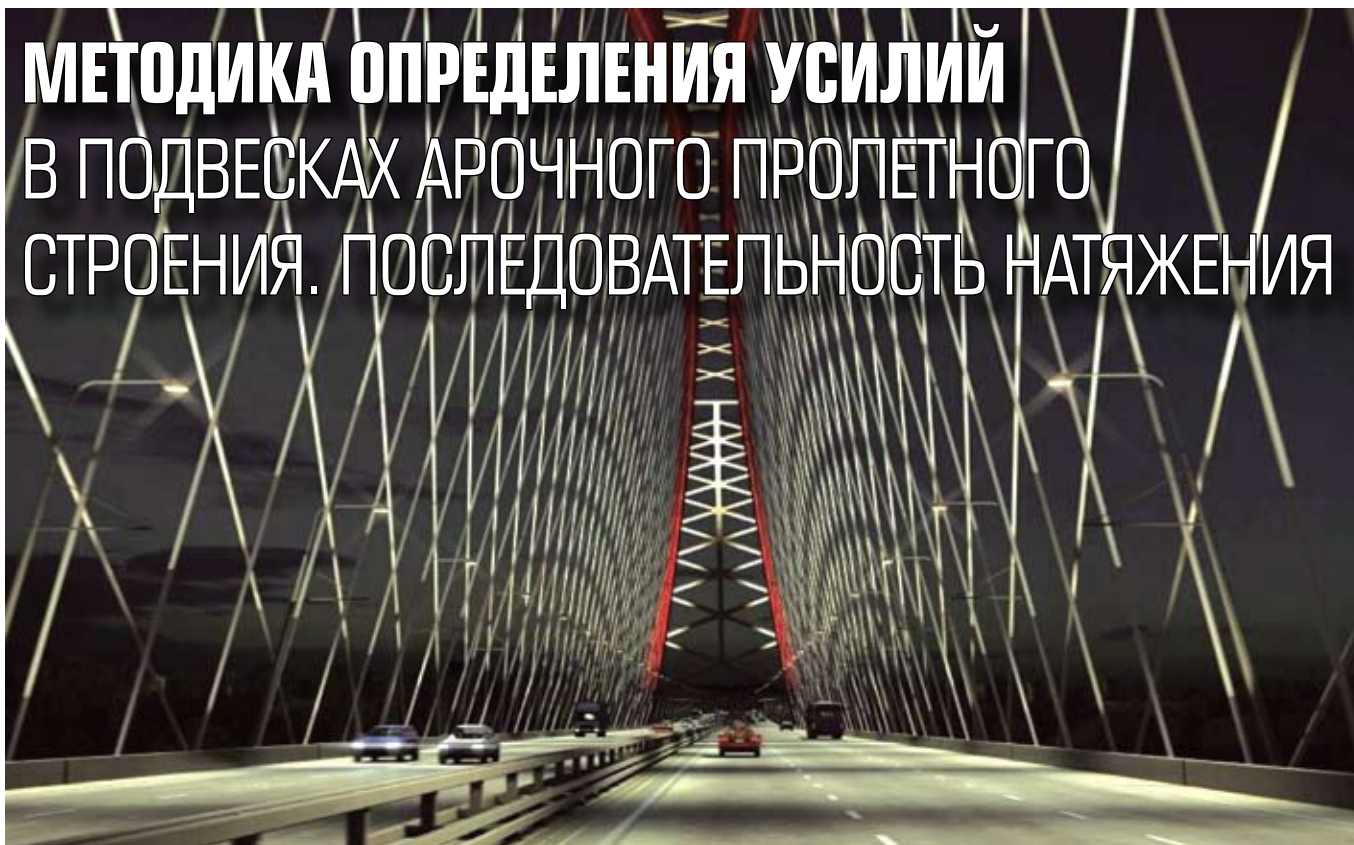


МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ПОДВЕСКАХ АРОЧНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ НАТЯЖЕНИЯ



Целевой функцией при поиске оптимального решения был выбран средне-взвешенный показатель отклонения профиля затяжки и кривизны свода. В качестве ограничений выступили минимально допустимые уровни усилий в выделенной группе подвесок, отмеченной на рис. 1 красным цветом. Поставленная задача решалась методом штрафных функций.

Основная сложность заключалась в определении количества независимых переменных, адекватного целям решаемой задачи. Изначально, учитывая общее количество подвесок, мы имеем 156 значений усилий их предварительного натяжения, что слишком много, чтобы даже задуматься о поиске оптимального решения.

Несмотря на отсутствие точной симметрии в расположении подвесок, число неизвестных параметров можно сократить до 39 (по количеству пар подвесок) без существенной потери точности. Но даже в этом случае задача все еще остается сложной для решения.

И здесь, как всегда, на помощь математике пришла механика. Проведенный глубокий анализ конструкции определил, что среди множества

Как и для любого сооружения с гибкими элементами, для арочного пролетного строения одним из основных является вопрос регулирования усилий в конструкции. Это обусловлено необходимостью обеспечения минимального заданного уровня усилий в процессе эксплуатации.

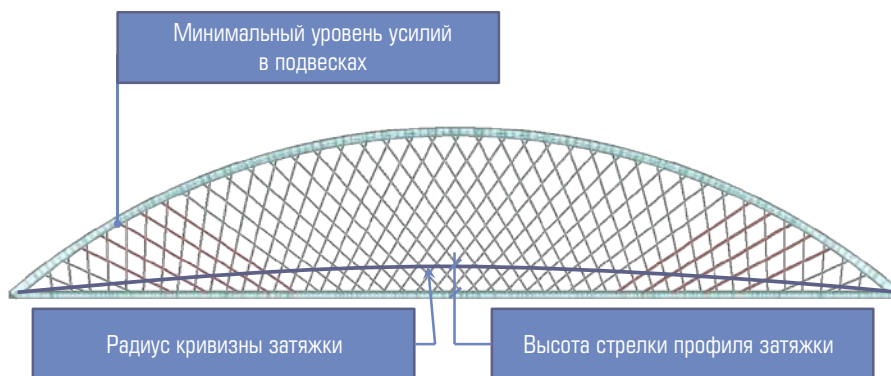


Рис. 1. Регулирование усилий. Контролируемые параметры

решений существуют такие, которые наибольшим образом влияют на контролируемые параметры, образуя так называемые базисные вектора. В результате число неизвестных переменных было сокращено до трех — по количеству критериев оптимизации.

На основе полученного решения были определены итоговые значения усилий с учетом временной нагруз-

ки и предварительного натяжения, а также подобраны сечения подвесок. Минимальное количество стрендов в подвесках — 8, максимальное — 19.

При расчете любой вантовой конструкции одной из самых сложных задач является расчет последовательности монтажа подвесок. Она состоит из двух подзадач:

■ проблема определения усилий в подвесках при наличии ограничений, когда заданы последовательность установки, натяжения и перетяжки;

■ проблема определения оптимальной последовательности, минимизирующей количество монтажных операций.

Первая задача в настоящее время носит сугубо технический характер. Вторая, напротив, не имеет каких-либо общих методик и ее успешное решение в каждом конкретном случае зависит от мастерства и опыта инженера.

Существуют типичные подходы к решению задачи расчета монтажных состояний конструкций на основе решения стадийных задач. В частности, специалистам хорошо известны такие методы расчета, как «сборка» и «разборка».

На рис. 2 схематично представлено решение задачи о последовательном нагружении однопролетной балки нагрузками q_1 и q_2 . При этом перед нагружением нагрузкой q_2 происходит защемление концов балки. Эпюры моментов в данной ситуации представляются предельно понятными.

Суть метода «разборки» заключается в обратном (по отношению к финальному состоянию конструкции) приложении нагрузок, граничных условиях, появлении соответствующих элементов конструкции в расчетных схемах.

«Разборка» (также как и «сборка») позволяет определить то напряженно-деформированное состояние конструкции, которое оказывается как бы «замороженным» в ней из-за операций монтажа (первый этап). На втором этапе «разборки» решение повторяется, но с учетом корректировки финального напряженно-деформированного состояния на величину замороженных усилий и деформаций.

К сожалению, из-за большого количества подвесок выполнение анализа путем стадийного расчета оказалось невозможным, в том числе из-за необходимости привлечения значительных компьютерных ресурсов. Общий объем дискового пространства, необходимый для решения данной задачи, составляет порядка 200 Gb. В итоге пришлось искать другой путь решения задачи. И здесь на помощь пришла гипотеза Кунцевича, положения которой многократно проверены практикой выполнения расчетов монтажных состояний.

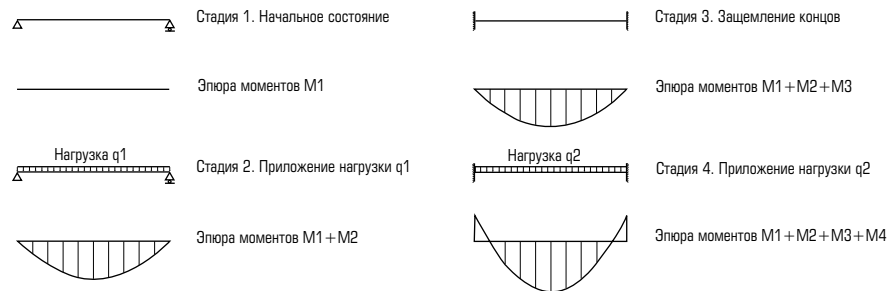


Рис. 2. Стадийный расчет. Метод «сборки»

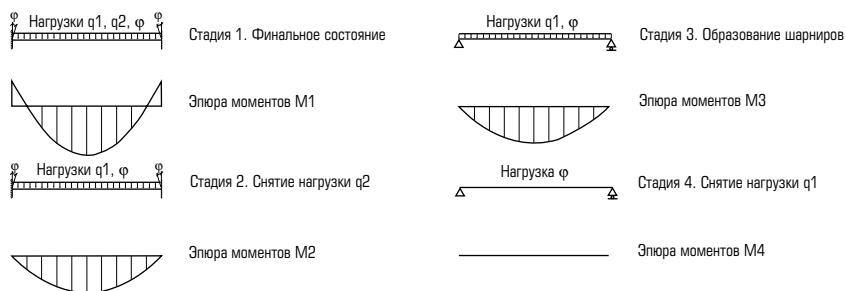


Рис. 3. Статический расчет

Согласно этой гипотезе, расчетной схемой для любого монтажного состояния упруго-деформируемой системы является статическая схема, в которой геометрия элементов, внешние и внутренние связи соответствуют данному состоянию, в нем приложены все внешние нагрузки, включая все начальные деформации. Статический способ расчета и был принят как основной при расчете последовательности монтажа подвесок арочного моста в Новосибирске (рис. 3).

Реальность, как всегда, более многообразна, чем мы можем себе представить в начале работы над объектом. Существуют обычные ограничения при монтаже вантовых систем, определяемые компанией-производителем. А именно:

- максимальные усилия в подвесках не должны превышать несущую способность подвесок и узлов их крепления;
- минимальное усилие в подвеске, приходящееся на один стренд, должно быть не менее 2 тс;
- величина вытяжки подвески на этапах натяжения/перетяжки должна быть не менее 40 мм;
- предельно допустимые значения изгибающих моментов в своде.

В нашем же случае дополнительным проблемным фактором стал жесткий график производства СМР,

в связи с чем пришлось запараллеливать работы по монтажу подвесок и разборке временных опор и сталея под надвижку свода. С расчетной точки зрения это означает, что на затяжке во время натяжения подвесок присутствует переменная, постепенно уменьшающаяся нагрузка. Существенных сложностей данное обстоятельство не добавляет, однако, повышает требования к производителям работ по точному соблюдению согласованного графика.

Расчет последовательности натяжения подвесок производился с применением сложной пространственной конечно-элементной модели, отражающей присутствие на затяжке временных конструкций.

Часто интересуются, существует ли возможность установки подвесок без последующей перетяжки. Для моста в Новосибирске ответ таков: да, существует. Если говорить конкретно, то без последующей перетяжки на этом объекте можно было установить 112 из 156 подвесок. Для этого пришлось бы полностью снять всю нагрузку от временных опор и сталея, установить по 7 пар подвесок на каждом полусводе для создания структурного каркаса, далее дополнить до группы подвесок, требующих перетяжки. Выполнить данную операцию. А затем последовательно в обе стороны от се-

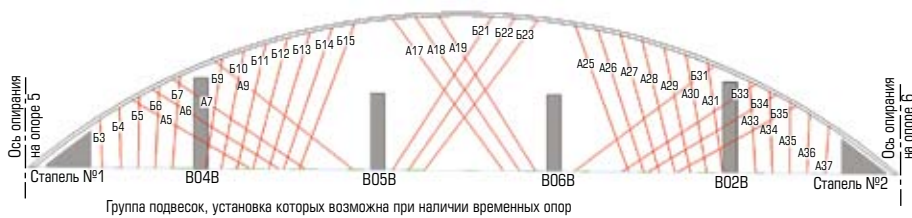


Рис. 4. «Красная» группа подвесок



Рис. 5. «Зеленая» группа подвесок

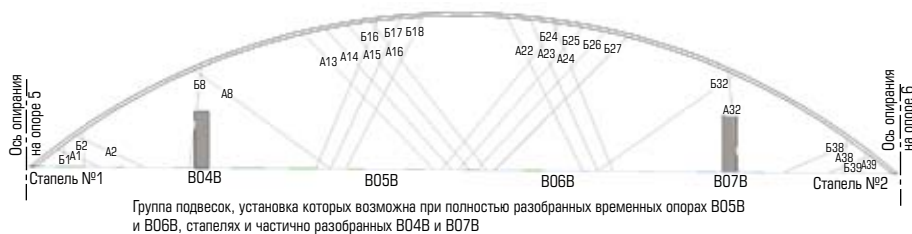


Рис. 6. «Серая» группа подвесок

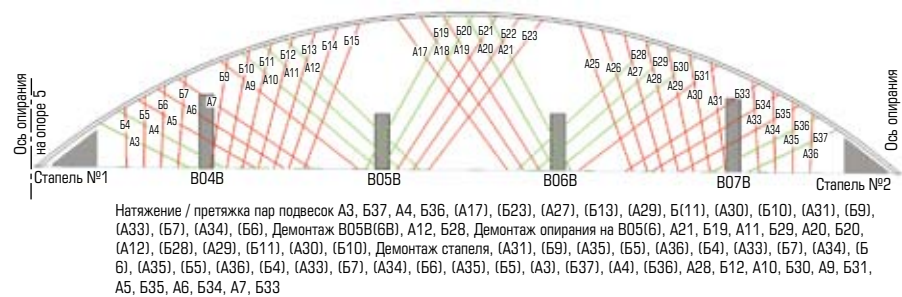


Рис. 7. Натяжение второй части «красной» группы и «зеленой» группы подвесок

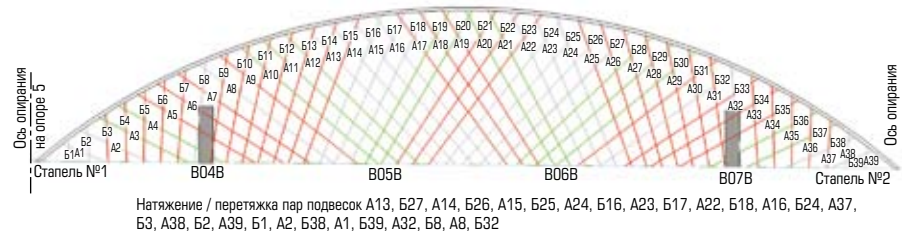


Рис. 8. Натяжение «серой» группы подвесок

редины арки устанавливать оставшиеся подвески. Такова теория. Однако на практике, с точки зрения графика производства работ, такой вариант неприемлем.

Теперь о последовательности натяжения подвесок. Одной из особенностей монтажа подвесок на Бугринском мосту стало их разделение на группы, в зависимости от возможности производства работ по натяжению из-за присутствия на затяжке определенных временных конструкций.

Были выделены:

- «красная» группа подвесок, установка которых возможна при наличии временных опор (рис. 4);
- «зеленая» группа подвесок, установка которых возможна только при частичной разборке центральных временных опор (рис. 5);
- «серая» группа подвесок, установка которых возможна только тогда, когда полностью разобраны центральные временные опоры и сталеи (рис. 6).

Основная причина такого разделения — ограничения при подъеме лебедками мастер-стренда и оболочки к верхнему активному анкеру.

Основная работа по установке гибких подвесок начинается с «красной» группы. Расчет показал, что не все они могут быть установлены сразу. В данный период работ последовательно производится демонтаж опирания свода на самоподъемные временные опоры 4 и 7, а также 8 и 9. Затем производится установка оставшейся части «красной» группы подвесок, а также «зеленой» группы. Во время этих операций производится демонтаж опирания свода на центральные временные опоры 5 и 6 (рис. 7).

Завершает процесс натяжения установка «серой» группы подвесок (рис. 8), после чего производится укладка покрытия проезжей части. Предусмотрена полная геодезическая съемка, а также измерение усилий во всех элементах вантовой системы. Далее Институтом «Стройпроект» будет проанализирована полученная информация, в случае выявления отклонений предусмотрен этап финальной регулировки усилий.

**М.Ю. Горохов, главный специалист;
А.И. Штепов, начальник отдела автоматизации;
А.Е. Петрова, инженер отдела автоматизации
ЗАО «Институт «Стройпроект»**