

А. А. ТАРНОПОЛЬСКИЙ, М. М. РОТМИСТРОВСКИЙ (ПИ «Днепрпроектсталь-конструкция»), М. И. КАЗАКЕВИЧ (ДИИТ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВИСЯЧЕГО МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ АММИАКОПРОВОДА ЧЕРЕЗ р. ДНЕПР ПРОЛЕТОМ 720 м

У статті представлені результати більш ніж тридцятирічного моніторингу за станом та дослідженням дійсної роботи металоконструкцій унікального висячого мостового переходу, зданого до експлуатації у 1978 р. Приводяться основні проблеми та складнощі, які були виявлені в процесі експлуатації споруди, а також авторські проектно-конструкторські рішення щодо їх усунення.

В статье представлены результаты более чем тридцатилетнего мониторинга за состоянием и исследованием действительной работы металлоконструкций уникального висячего мостового перехода, сданного в эксплуатацию в 1978 г. Приводятся основные проблемы и сложности, выявленные в процессе эксплуатации сооружения, а также авторские проектно-конструкторские решения по их ликвидации.

The results of more than 30-year monitoring and investigations of the real work state of exceptional suspended bridge steel structures made in 1978 are presented in the paper. The major problems and difficulties discovered in the process of the structure exploitation as well as authors' design approaches for their elimination are given here.

В 1978 г. сдан в эксплуатацию уникальный висячий мост через р. Днепр пролетом 720 м, предназначенный для пропуска аммиакопровода диаметром 335,6 мм и 4^х ниток сопутствующих коммуникаций в трубах 76 мм (рис. 1, 2).



Рис. 1. Общий вид моста



Рис. 2. Общий вид моста с пилона правого берега

Проект металлоконструкций моста разработан ЦНИИПСК г. Москва. Изготовлены металлоконструкции на Днепропетровском заводе им. Бабушкина. Монтаж металлоконструкций осуществлен трестом «Союзмонтажгаз».

Мост представляет собой висячую систему, основными элементами которой являются (рис. 3):

- две висячие вертикальные фермы пролетом 720 м, состоящие из несущих кабелей, раскосов

(наклонных подвесок) и решетчатой балки жесткости (рис. 4);

- два береговых пилона (рис. 5)

- двухъярусная горизонтальная ветровая система, состоящая из поясов и горизонтальных оттяжек.

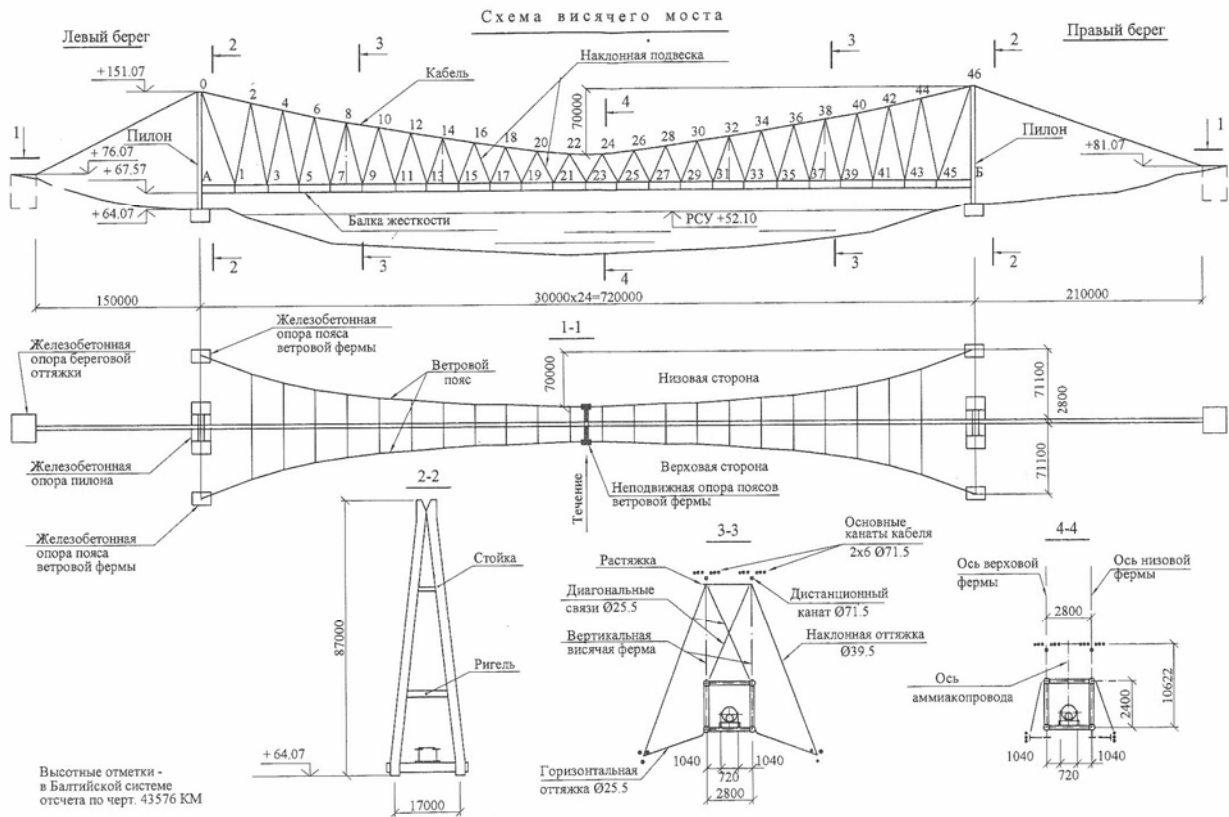


Рис. 3. Конструктивные элементы моста



Рис. 4. Общий вид моста. Верхний пояс и наклонные подвески висячих ферм, балка жесткости, пилон, ветровая ферма



Рис. 5. Пилон. Кабели и наклонные подвески висячих ферм

Вертикальные висячие фермы и горизонтальные ветровые фермы объединены в пространственную систему наклонными оттяжками, балкой жесткости и поперечными (в 4-х сечениях по длине моста) крестовыми связями и растяжками из канатных элементов (рис. 6).



Рис. 6. Наклонные подвески и балка жесткости

Висячие фермы с треугольной решеткой разбиты на 24 панели по 30 м каждая. Высота фермы в середине пролета 8,1 м, у пилона 84,1 м. Расстояние между фермами 2,8 м.

Верхний пояс каждой висячей фермы (несущий кабель) состоит из 6-ти основных канатов диаметром 71,5 мм и одного дистанционного каната. Кабели опираются на седловидные опоры пилонов и переходят в береговые оттяжки.

Раскосы (наклонные подвески) висячих ферм выполнены из одиночного каната диаметром 39,5 мм. Раскосы со стороны балки жесткости оканчиваются винтовыми стяжками для регулировки натяжения наклонных подвесок.

Балка жесткости представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, состоящую из 2-х вертикальных ферм, верхние пояса которых соединены связевой фермой, и системы поперечных и продольных балок в уровне нижних поясов вертикальных ферм

(рис. 7). Продольный профиль балки жесткости выполнен по плавной кривой со строительным подъемом. В уровне нижнего пояса на поперечных балках через каждые 12 м установлены тороидальные роликовые опоры. На них опирается трубчатый кожух диаметром 530 мм, внутри которого помещен аммиакопровод.



Рис. 7. Общий вид балки жесткости

Балка жесткости в середине пролета жестко соединена с поясами ветровых ферм, а на обоих концах моста имеет продольно-подвижное опирание.

Ветровая система состоит из обращенных выпуклостями друг к другу параболических (в плане) ферм, пояса которых выполнены из 3-х стальных канатов диаметром 71,5 мм каждый. Пояса ферм соединены с балкой жесткости и с верхними узлами висячих ферм с помощью канатных оттяжек (рис. 8).

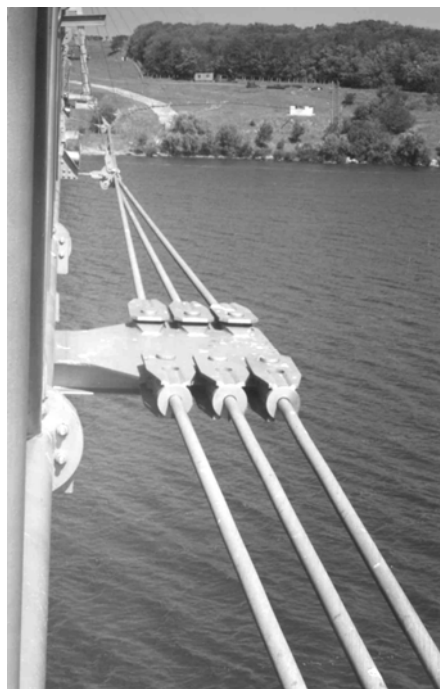


Рис. 8. Пояс ветровой фермы и средний узел крепления пояса к балке жесткости

Пилоны выполнены в виде рамы с наклонными стойками. Высота пилона 87 м, ширина 17 м. Стойки выполнены в виде пространственных элементов из 2-х сварных двутавров. Стойки связаны 2-мя промежуточными ригелями.

Узловые соединения несущего кабеля с наклонными подвесками выполнены посредством 2-х деталей, обжимающих канаты (по 3-и каната), соединенных стяжными высокопрочными болтами. К стяжным деталям крепятся фасонки подвесок (рис. 9). К фасонкам балки жесткости подвески крепятся при помощи винтовых стяжек.



Рис. 9. Узел верхнего пояса висячей фермы

В проекте моста пролетом 720 м через р. Днепр был учтен опыт строительства аналогичного моста пролетом 660 м через р. Амударью (пос. Келиф) и исследований, проведенных институтом «Днепрпроектстальконструкция» в части обеспечения аэродинамической устойчивости. В частности: объединены в общую пространственную систему вертикальные несущие фермы и ветровые фермы, балка жесткости выполнена из трубчатых стержней.

С момента ввода моста в эксплуатацию и до настоящего времени (около 30 лет) институт «Днепрпроектстальконструкция» ведет систематическое наблюдение и исследование действительной работы несущих металлических конструкций, узлов и соединений. В состав исследований входило: определение фактического состояния конструкций и напряженно-деформированного состояния элементов и моста в целом, измерение динамических параметров конструкций, натяжения элементов висячей системы (рис. 10), натяжения высокопрочных болтов (рис. 11).

На начальном этапе эксплуатации в процессе пусковых испытаний определялись действительные характеристики работы моста и их соответствие расчетным параметрам (руководители работ Казакевич М. И., Шульман З. А.).



Рис. 10. Измерение усилий в наклонных подвесках с помощью накладных динамометров



Рис. 11. Измерение усилий в высокопрочных болтах

Статические испытания от постоянной нагрузки (заполнение водой трубы) показали, что деформация моста в целом, максимальное напряжение в поясах балки жесткости, в пилоне и анкерной балке ниже или близки к расчетным. Усилия натяжения в канатных элементах также близки к расчетным. Остаточных прогибов не наблюдается. Замеренные частоты собственных колебаний составляли: в середине балки жесткости – в вертикальной плоскости 0,293 Гц, в горизонтальной плоскости 0,164 Гц; пилон (отметка 31,0 м) – вдоль моста 1,49 Гц.

В процессе дальнейшей эксплуатации моста (около 20 лет) параметры колебаний изменялись в ту или иную сторону в пределах до 2...6 % и оставались при этом близкими по значениям, принятым в проекте моста.

Замеренный в период пусковых испытаний логарифмический декремент затухания колебаний равен 0,065, что также близко к расчетному.

Установлено, что при изменении температуры на 1 °С прогиб в середине пролета изменяется на 21 мм (по расчету 20,7 мм).

Пусковые испытания подтвердили правильность принятых при проектировании расчетных предпосылок.

Проведенные спустя год после ввода в эксплуатацию наблюдения за скоростью и направлением ветра установили, что преобладающее направление ветра близко совпадает с осью русла р. Днепр в месте перехода.

Установлен неравномерный характер распределения ветровой нагрузки по длине моста. При этом усредненное значение скорости ветра близко к нормируемому. Испытания подтвердили доминирующее влияние реальной ветровой нагрузки на напряженно-деформированное состояние сооружения. Инструментальное аэродинамическое наблюдение в условиях естественного ветрового потока на основе изучения реакции сооружения и его отдельных элементов показали, что сооружение колеблется по одной или нескольким собственным частотам низших форм с максимальными амплитудами, не превосходящими следующих величин: для вертикальных колебаний 1/80000 длины пролета и для горизонтальных колебаний 1/50000 длины пролета. Столь низкие значения свидетельствуют об аэродинамической устойчивости сооружения в целом и его отдельных элементов.

После 5-ти годичной эксплуатации были выполнены визуальные и инструментальные исследования состояния несущих металлоконструкций, усилия натяжения канатных элементов и параметры колебаний. Исследования показали, что в целом элементы моста находятся в удовлетворительном состоянии: в большинстве канатов раскосной системы усилия натяжения находятся в пределах проектных значений и лишь в 4-х канатах усилия составили 3...3,5 т (проектные 4,0 т). Частоты колебаний в ветровом потоке практически не изменились. Впервые после пуска моста были измерены усилия натяжения высокопрочных болтов в 100 % узлов канатных элементов. Измерения показали в целом отсутствие падения начальных значений. Однако, в отдельных болтах (всего 8 шт.) было отмечено явление замедленного хрупкого разрушения (ЗХР), которое объясняется высокими значениями твердости ма-

териала болтов и недостаточной пластичностью. Там же впервые были обнаружены локальные повреждения антикоррозионного покрытия, в том числе цинкового покрытия канатов.

Исследования, проведенные еще через 5 лет, т.е. после 10-ти летней эксплуатации, показали, что основные параметры работы металлоконструкции: усилия в элементах вантовой системы, геометрические характеристики сооружения, динамические характеристики в ветровом потоке стабильны и практически не изменились. В дальнейшем в 1995 г. (немного менее 20-ти летней эксплуатации) было детально исследовано состояние и натяжение высокопрочных болтов практически во всех узловых соединениях: канатных элементов, в седле пилонов, во фланцевых соединениях элементов решетчатой фермы жесткости. Необходимость проверки натяжения высокопрочных болтов диктовалась, главным образом, следующими факторами: релаксация усилий и охрупчивание материала болтов. Отмеченное незначительное снижение усилий натяжения высокопрочных болтов в отдельных узлах за счет релаксации не снизили сдвигустойчивость соединений. Было рекомендовано произвести подтяжку всех болтов в жимках оголовков пилонов. Во фланцевых соединениях наблюдалось массовое повреждение герметизации соединений элементов фермы жесткости, а также во фрикционных соединениях на пилонах.

В 1997 г. с целью обеспечения надежности и безаварийности эксплуатации моста в институте «Днепрпроектсальконструкция» была разработана и согласована со службой эксплуатации программа, которой предусмотрены ежедневные осмотры службой эксплуатации, ежемесячные осмотры персоналом службы эксплуатации с привлечением специализированной организации, ежегодные контрольные измерения, а также специальные обследования, проводимые 1 раз в 3 года.

В 1999 г., т.е. спустя 20 лет после ввода в эксплуатацию, впервые было установлено падение натяжения на 18 % в 34-х наклонных подвесках, а это 1/3 общего количества подвесок вертикальной висячей фермы. Исключение из работы столь значительного количества подвесок (усилия натяжения меньше проектного 40 кН) могло привести к снижению аэродинамической устойчивости. При этом в 30 наклонных подвесках обнаружено, что практически исчерпана длина свободной резьбы винтовых стяжек. Это обстоятельство потребовало разра-

ботки и осуществления специальных устройств, которые бы обеспечили замену винтовых стяжек (об этой сложной процедуре остановимся ниже). Тревожный сигнал «прозвучал» в узлах крепления прижимных планок к несущему кабелю вертикальной фермы, где из-за отсутствия (рис. 12) герметизации было обнаружено коррозионное повреждение высокопрочных болтов. В результате была произведена замена всех скородированных высокопрочных болтов в узлах крепления поясов висячей и ветровой ферм с раскосами.

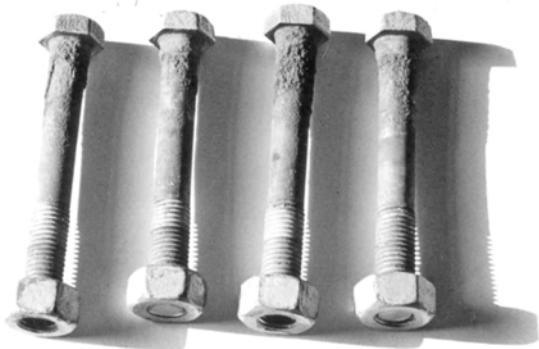


Рис. 12. Узел крепления наклонных подвесок к верхнему поясу висячей фермы. Коррозия болтов вследствие попадания воды в пространство между соединительными деталями узла

Как указывалось выше, замена винтовых стяжек и регулировка натяжения наклонных подвесок висячей фермы оказалось сложной технической задачей.

Для замены винтовых стяжек был разработан проект, изготовлены и устанавливались уникальные специальные временные приспособления, состоящие из инвентарных тяг для закрепления подвесок на период замены винтовых стяжек (рис. 13, 14). Проведенная в сложных условиях замена стяжек подтвердила работоспособность разработанного метода и конструкций временного приспособления.

Сложную инженерную задачу представляет собой разработка методики, которая позволит решить проблему регулировки усилий в подвесках висячих ферм, обеспечив при этом при наименьшем количестве «попыток» создания во всех подвесках одинаковых проектных усилий натяжения.

Расчеты конструкций, содержащих вантовые элементы (рис. 15), относятся к категории наиболее сложных геометрически нелинейных расчетов. Проблема состоит в том, что характеристики вантовых элементов могут меняться в широких пределах и настолько резко, что это требует создания специальных алгоритмов ре-

шения таких задач. Для такого решения задач в программном комплексе Selena (автор программы Бритвин Е. И., ДПСК) был разработан специальный алгоритм, позволяющий успешно находить решение не только для систем с натянутыми вантами, но и для конструкций с провисающим канатом и вантовыми системами. Решение реализовано в виде матрицы, представляющей собой изменение (приращение) усилия, возникающего в i -том элементе из-за изменения усилий в k -том элементе на 10 кН, изменение усилий соответствовало определенному углу поворота «штурвала», устанавливаемого на стяжном устройстве. В результате проведенной регулировки и замеров натяжения на всех 92-х подвесках усилия натяжения были одинаковыми, близкими к проектным значениям.

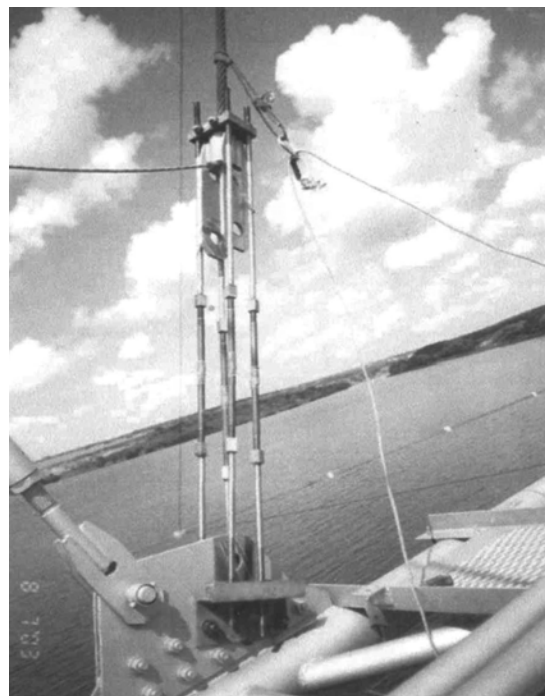


Рис. 13. Общий вид устройства для замены винтовых стяжек

Было также проведено поэтапное регулирование усилий в элементах ветровых ферм.

В процессе наблюдения за мостом из-за превышения на 10...60 % давления, были выявлены случаи разрушения текстолитовых роликов, на которые опирается аммиакопровод (всего по длине моста 73 опоры). Для обеспечения равномерного давления на катки по специально разработанной программе была выполнена достаточно сложная пооперационная регулировка катков за счет их вертикального перемещения при одновременном контроле фактических давлений на каток и вертикальном положении трубы. В результате регулировки

давление аммиакопровода на катки приближенно к проектным значениям – 26...30 кН.

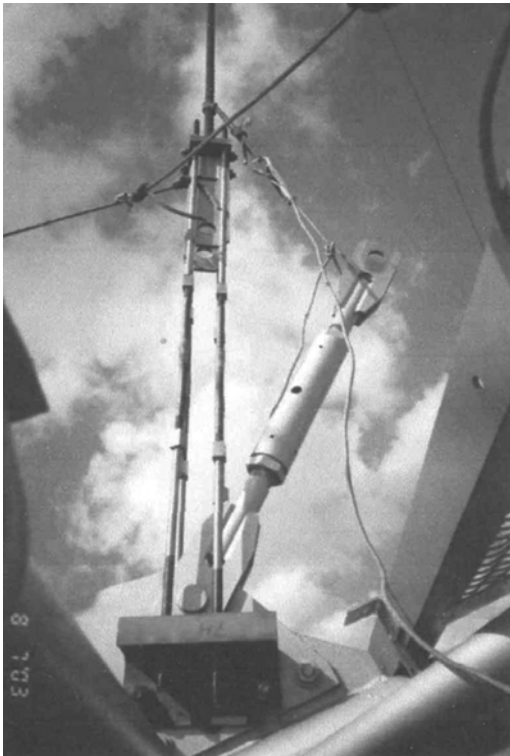


Рис. 14. Демонтаж винтовой стяжки

Выводы

Многолетние, около 30 лет, исследования действительной работы металлоконструкций уникального висячего моста под аммиакопровод пролетом 720 м показали, прежде всего, что, несмотря на наблюдавшееся в процессе эксплуатации некоторое падение усилий натяжений в наклонных подвесках и преднапряженных высокопрочных болтов, коррозионного повреждения канатов, конструкции моста подтвердили правильность проектных предпосылок, его работоспособность и живучесть в условиях реальных метеорологических воздействий.

Исследования доказали эффективность систематического визуального и инструментального наблюдения за состоянием конструкций и за всеми параметрами работы отдельных элементов и моста в целом.

Благодаря проводимым наблюдениям удалось своевременно выявлять дефекты и повреждения, устранять и предотвращать их дальнейшее развитие, а также вносить корректировки в основные параметры, обеспечивающие прочность и аэродинамическую устойчивость сооружения.

Есть уверенность в необходимости продолжения систематического наблюдения с целью принятия мер по обеспечению надежности и безаварийности эксплуатации моста.

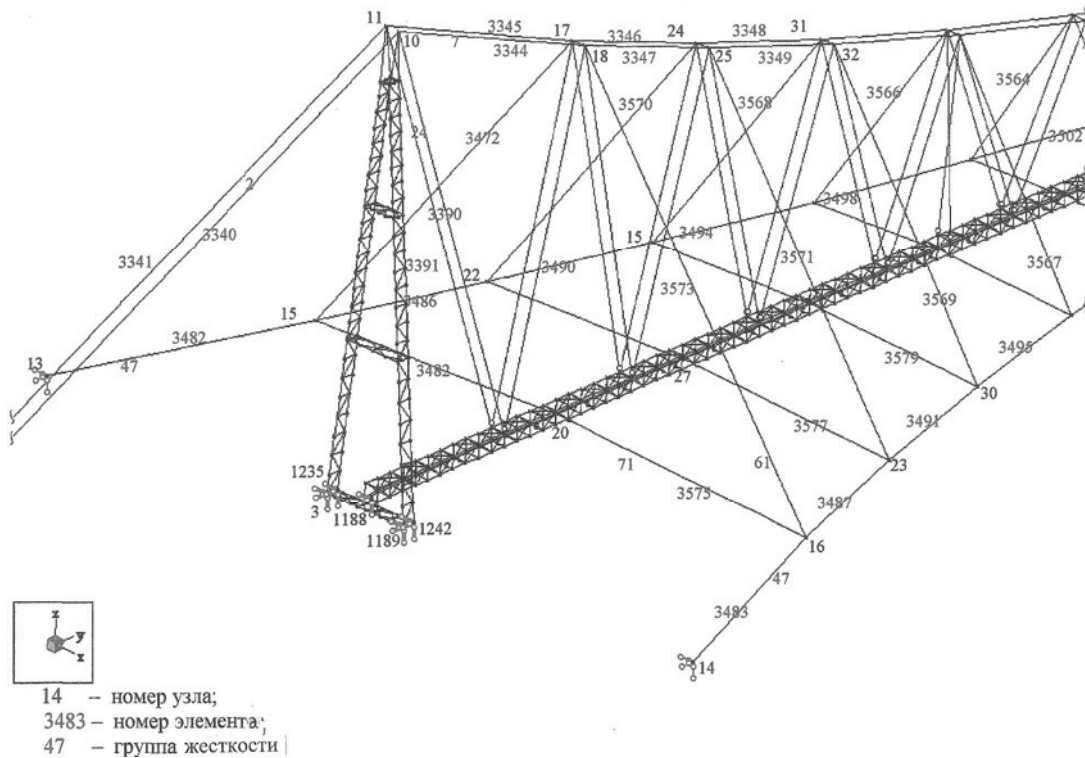


Рис. 15. Фрагмент расчетной схемы висячего моста

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казакевич М. И. О проверке аэродинамической устойчивости висячих мостов и переходов / М. И. Казакевич, М. М. Кравцов, В. Ю. Попов // Строительная механика и расчет сооружений, № 6. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 45-48.
2. Казакевич М. И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
3. Казакевич М. И. Методика натурных испытаний и длительных наблюдений висячих мостов и переходов / М. И. Казакевич, М. М. Кравцов, З. А. Шульман, Г. Н. Эйхе // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 207/24 / Под ред. акад. Н. Г. Бондаря. – Д., 1980. – С. 58-65.
4. Казакевич М. И. Определение критической скорости аэроупругой неустойчивости висячего перехода // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Д., 1982. – С. 48-55.
5. Казакевич М. И. Аэродинамика мостов. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.
6. Шкловский Е. И. Натуральные испытания висячего трубопроводного моста через реку Днепр пролетом 720 м / Е. И. Шкловский, Ш. К. Вейцман, М. И. Казакевич и др. // В. сб.: Тр. ЦНИИПроектстальконструкция / Под ред. акад. Н. П. Мельникова. – М., 1980. – С. 81-88.
7. Казакевич М. М. Инструментальные наблюдения за работой вантовых трубопроводных мостов больших пролетов / М. М. Казакевич, Е. А. Нейман, З. А. Шульман, М. М. Кравцов // Экспериментальные исследования эксплуатационной надежности металлических конструкций зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1986. – С. 22-28.
8. Шульман З. А. Исследование поведения вантового моста пролетом 720 м через р. Днепр в естественном ветровом потоке / З. А. Шульман, Е. А. Нейман, М. И. Казакевич // Материалы совещания-семинара «Исследование, разработка и внедрение висячих систем в покрытиях и инженерных сооружениях». – К.: ЗНИИЭП, 1982. – С. 303-308.
9. Казакевич М. И. Реакция висячего перехода пролетом 720 м на реальное ветровое воздействие / М. И. Казакевич, А. С. Мякшин, Е. А. Нейман, Ю. С. Фрейдин, З. А. Шульман // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 214/25. – Д.: ДИИТ, 1982. – С. 45-56.
10. Шкловский Е. И. Натурные испытания висячего трубопроводного моста через реку Днепр пролетом 720 метров / Е. И. Шкловский, Ш. К. Вейцман, З. А. Шульман, А. А. Гордашников, М. И. Казакевич, М. М. Кравцов // Исследование и разработка по висячим и вантовым металлическим конструкциям: Тр. ЦНИИПроектстальконструкция. – М.: ЦНИИПроектстальконструкция, 1980. – С. 81-88.

Поступила в редколлегию 23.10.2007.