

монических функций времени, также удовлетворяющих уравнению движения. Дополнительным вкладом в пользу пластинчатой РДМ, как уже отмечалось, является возможность расчётного анализа НДС узловых сварных швов несущих конструкций кранов, проектируемых как пространственные сварные сооружения, что следует, в частности, из НП-043-11[7].

Список литературы

1. Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В. и др. Конечно-элементные компьютерные модели подъёмных сооружений // Современное машиностроение. Наука и образование : мат-лы IV Международной научно-практической конференции. СПб. : Изд-во СПб. гос. политехн. ун-та, 2014. С. 743 – 756.
2. Panasenko N. N., Sinelshchikov A. V., Rabey V. V. The Calculated Justification of Seismic Stability of Load-Lifting Cranes // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2014. V.9. P. 104–123.
3. Панасенко Н. Н., Рабей В. В., Синельщикова Л. С. Конечно-элементная модель демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъёмных кранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Астрахань : Изд-во АГТУ, 2013. № 2 (56). С. 41 – 49.
4. Котельников В. С., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В. Разработка модели землетрясений в расчётном анализе сейсмостойкости подъёмных сооружений / Безопасность труда в промышленности. 2007. № 9. С. 42–46.
5. Панасенко Н. Н., Божко С. Г. Сейсмостойкие подъёмно-транспортные машины атомных станций. Красноярск : Изд-во Красноярского государственного университета, 1988. 208 с.
6. Панасенко Н. Н. Динамика и сейсмостойкость подъёмно-транспортного оборудования атомных станций: дисс. ... д-ра техн. наук: в 2 ч. Ч. 1. Новочеркасск : НГТУ, 1992. 475 с.
7. НП-043-2011. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъёмных кранов для объектов использования атомной энергии (в редакции приказа Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г., № 549). М.: Ростехнадзор, 2014. 14 с.
8. Синельщиков А.В. Вероятностно-статистическая модель расчётного сейсмического воздействия на ОИАЭ г. Железногорска / В. И. Мацеля, П. Н. Сеелев, Н. Н. Панасенко, А. В. Синельщиков [др.] // Механики XXI века. Братск : Изд-во БрГУ, 2016. С. 263–277.
9. Синельщиков А. В., Панасенко Н. Н., Синельщикова Л. С. Математическая модель сейсмических спектров ответа для проектных основ сооружений с крановыми нагрузками. Астрахан: Вестник АГТУ, 2012. № 1 (53). С. 66–74.
10. Юзиков В. П., Завьялова О. Б. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 1 (625). С. 108–115.

УДК 624

УЧЕТ КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ИМЕЮЩИХ ГИБКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

О. Б. Завьялова

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия)*

В статье рассмотрена методика расчёта строительной конструкции на прочность и жесткость с учетом нелинейной работы гибких связей. Определены условия, при которых

производится исключение связей из расчетной схемы. Даны рекомендации по моделированию узлов расчетной схемы, учитывающих неразрезность вантовых элементов.

Ключевые слова: Конструктивная нелинейность, гибкие связи, расчетная схема, моделирование узлов

In article the method of calculation of a building construction on durability and rigidity taking into account nonlinear work of flexible communications is considered. Conditions under which the exception of communications of the settlement scheme is made are defined. Recommendations about modeling of the knots of the settlement scheme considering a nerazreznost of guy elements are made.

Keywords: Constructive nonlinearity, flexible communications, settlement scheme, modeling of knots

Рассмотрим один из типов конструктивной нелинейности в работе строительных конструкций, содержащих в своём составе гибкие элементы, работающие только на растяжение, или ванты. В расчете таких конструкций следует учитывать деформации элементов и своевременно исключать из расчетной схемы ванты, начинающие «воспринимать» сжимающие нагрузки. Для примера рассмотрим расчёт надземной эстакады на высоких опорах, служащей для подъёма и транспортирования речного катера через автодорогу. Для подъёма и перемещения катера используется электрическая таль, движущаяся по нижнему поясу прокатного двутавра, опирающегося на три стойки. Двутавровая балка имеет консольный свес длиной 7 метров со стороны реки, т.е. в месте подъёма катера. Для придания дополнительной жёсткости и с целью уменьшения свободного пролёта, балка дополнительно раскрепляется системой вант, перекинутых через опорные стоечные элементы (см. рис.1), и являющихся самоуравновешенной системой.

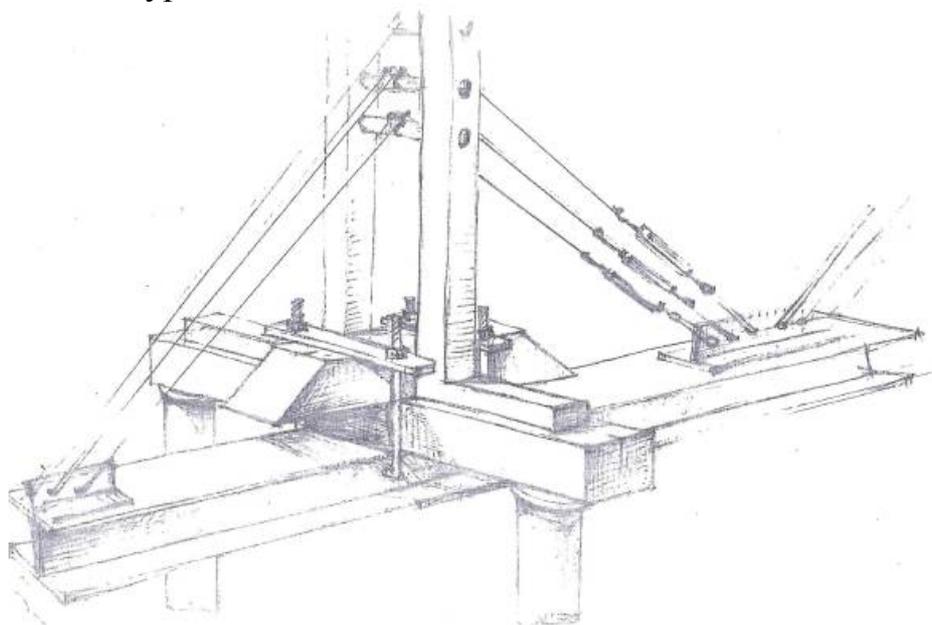


Рис. 1. Узел крепления вант к двутавровой балке

Для регулирования натяжения вант используются гильзо-стержневые анкеры. Следует отметить, что в случае натяжения вант с целью создания в них предварительного напряженного состояния, ванта будет «работать на

сжатие» до тех пор, пока не выработает напряжения предварительного растяжения, после чего исключается из работы. Но в этом случае следует постоянно контролировать и регулировать натяжение вант до заданного уровня нормальных растягивающих напряжений. В рассматриваемом случае предварительное напряжение в вантах не создаётся. Расчетная схема рассматриваемой конструкции приведена на рисунке 2. Целью расчёта является определение расчетных усилий и проверка прочности и жесткости принятой конструкции. Расчет выполнялся по методу конечных элементов в программе SHAP (автор Шапошников Н.Н.).

Все элементы конструкции, включая тросы, заданы стержневыми конечными элементами, имеющими различную жесткость поперечного сечения.

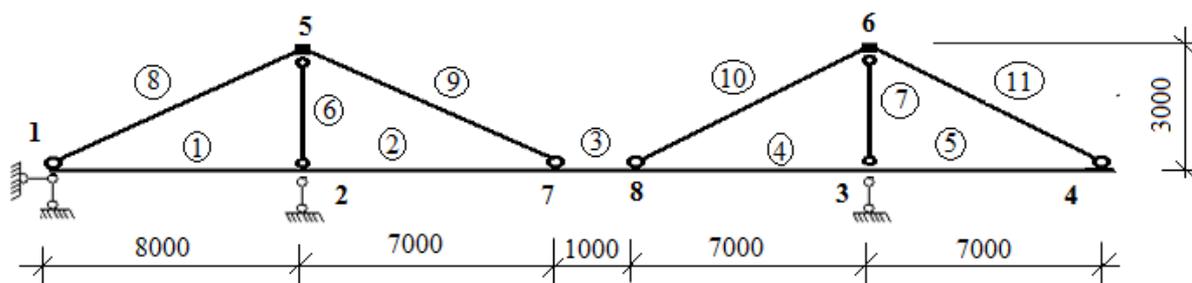


Рис. 2. Расчетная схема. Цифрами пронумерованы номера узлов, цифрами в кружках – номера элементов

Элементы 1-5 представлены двутавром № 50 ($A=100 \text{ см}^2$, $I_x=39700 \text{ см}^4$), стойки 6-7 на самом деле являются рамным элементом из двух вертикальных стержней коробчатого профиля №100 ($A=17,9 \text{ см}^2$, $I_x=260 \text{ см}^4$ – для одной стойки; для двух стоек в плоскости работы вант $A=35,8 \text{ см}^2$, $I_x=520 \text{ см}^4$). И наконец, ванты. Для упрощения расчета были приняты тросы суммарного сечения $A=3 \text{ см}^2$, момент инерции $I_x=5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^4 \approx 0$ (ноль вводить нельзя) – при расчете на растяжение. В случае отрицательных продольных сил для исключения троса из расчёта его площадь также задаётся $A=3 \cdot 10^{-10} \approx 0$. Наибольшую сложность в формировании расчётной схемы вызвало моделирование узлов 5 и 6 опирания вант на стойку. С одной стороны, ванта не должна передавать горизонтальные усилия на стойку, которой заменяется опорная рама, в соответствии с рисунком 1, значит, этот узел должен быть шарнирным; с другой стороны, усилие в ванте по всей длине должно быть одинаковым, для этого ванта должна быть непрерывной. В результате было принято решение принять узел стыковки вант «жестким», имитируя изменение направления ванты, а элементы стоек 6-7 задать по концам шарнирными (рисунок 2, узлы 5 и 6). Результаты расчета показали, что принятая конструкция узла в полной мере удовлетворяет реальным условиям работы рассматриваемого стыка. Величина подвижной нагрузки учитывает вес катера и электрической тали и принята 1,5 тс, или 15 кН.

В задаче были рассмотрены несколько вариантов загрузки подвижной нагрузкой. В первом варианте сосредоточенная сила $P=15 \text{ кН}$ прикладывается на конце консоли. Собственный вес стальной балки пока не учитывается. Предварительный расчет показал, что тросы 8 и 9 «работают» на сжатие,

после чего их жесткость на растяжение-сжатие ЕА была задана примерно равной нулю, и расчет произведён вновь. Новый расчёт определил значение изгибающих моментов в балке на уровне 42,5 кН·м, сжимающая сила в стойке 7 равна 20,8 кН, усилия в тросах 10-11 равны 26,4 кН, максимальный прогиб в узле 4 (на консоли) равен 27 мм. Для сравнения, в предварительном расчете со «сжатыми» вантами максимальный момент в балке был 33,8 кН·м, т.е. меньше реального на 34%. Согласитесь, разница ощутимая! Затем был выполнен расчет с учетом собственного веса двутавровой балки, равного 80кг/м. Прогиб конца консоли увеличился до 28 мм, изгибающий момент в балке вырос до 50 кН·м. Что касается прочности балки, то она проходит с большим запасом. Прогиб составляет 1/250 вылета консоли, т.е. 0,004. Инструкции по эксплуатации электрических талей определяют максимальный уклон пути от прогиба балок в пределах 0,003. Следовательно, эксплуатационная жесткость конструкции недостаточна. Было принято решение увеличить площадь поперечного сечения вант 10-11 вдвое, до 6 см². Вновь выполненный расчет показал уменьшение прогиба консоли до значения 20 мм (уклон $20/7000=0,0029 \leq 0,003$), при этом растягивающее усилие в тросе 10-11 составило 36 кН, то есть прочность при растяжении выполняется с большим запасом. Эпюра моментов и поперечных сил для этого случая показана на рисунке 3. Сжимающее усилие в правой стойке равно 28 кН.

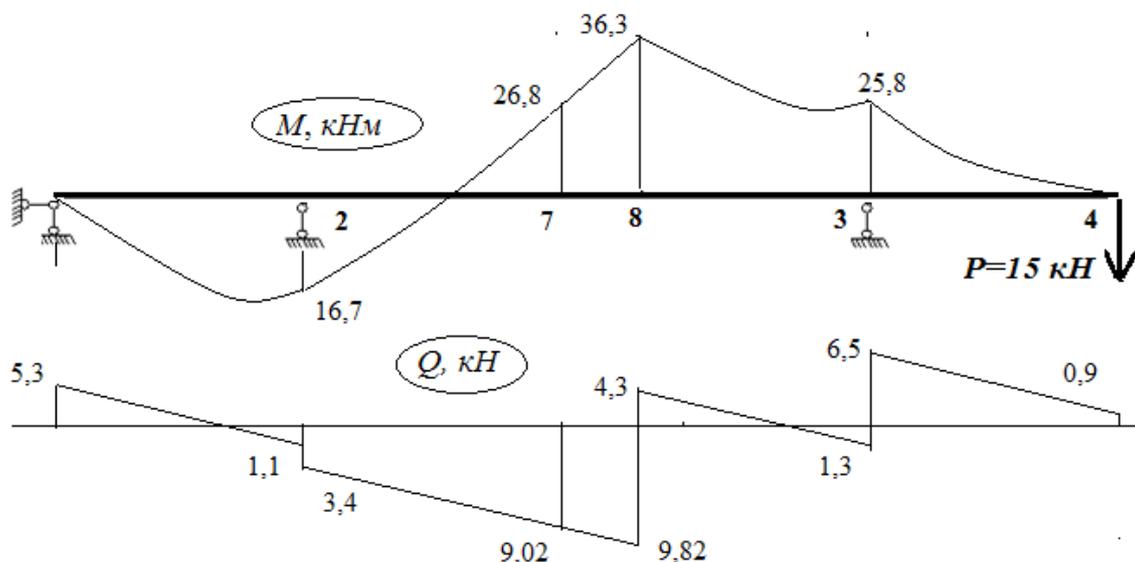


Рис. 3. Эпюры внутренних усилий в балке от собственного веса и сосредоточенной силы в узле 4

Во втором варианте загрузки сосредоточенная сила была приложена в узле 7. Предварительный расчет показал, что в этом случае, вопреки ожиданию (предполагалось, что все тросы будет растянуты), тросы 10-11 оказались «сжаты», что объясняется перемещением незакрепленной консоли вверх, поэтому их также пришлось исключить из расчета. Максимальный момент в балке составил для этого нагружения 37,1 кН (рис. 4), максимальный прогиб в среднем пролёте оказался равным 7,5 мм, что на пролёте в 15 метров незначительно.

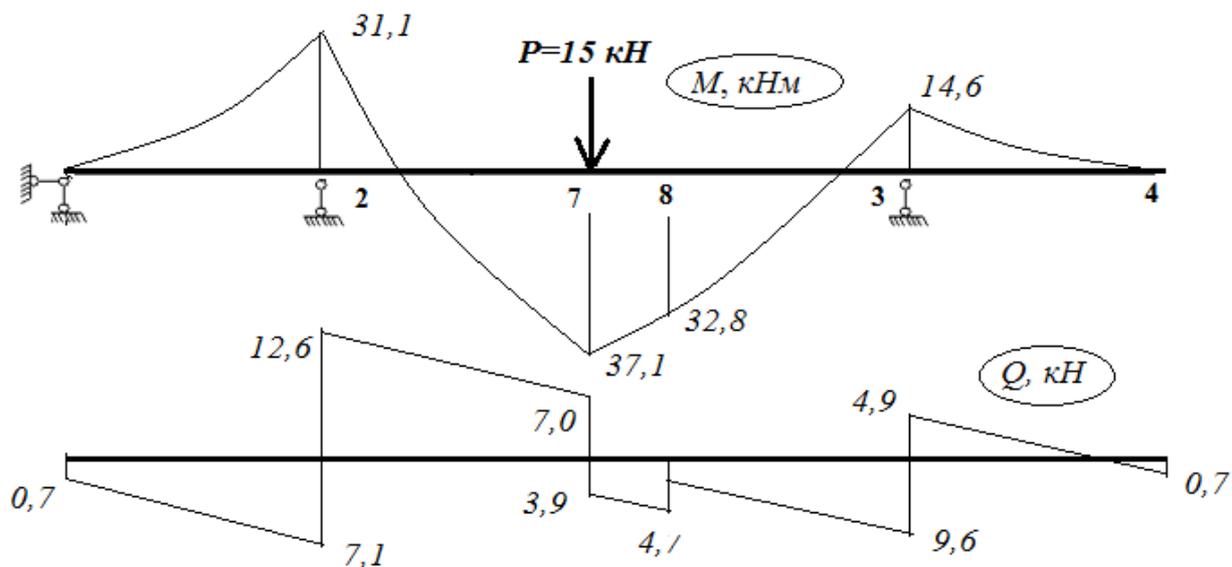


Рис. 4. Эпюры внутренних усилий в балке от собственного веса и сосредоточенной силы в узле 7

Дальнейший расчет состоит в проектировании узлов конструкций, проверке опорных стоек на устойчивость при центральном сжатии и т.д.

Выводы:

1. Расчет конструкций, содержащих элементы большой гибкости (тросы, ванты, оттяжки) необходимо предварять расчетом, выявляющим работу этих элементов под нагрузкой, с целью исключения из расчета «сжатых» вант.

2. Изгибную жесткость гибких элементов следует задавать очень малой, но не равной нулю, иначе программа не сможет выполнить расчет из-за невозможности обращения матрицы жесткости.

3. Продольную жесткость «сжатых» элементов также следует задать бесконечно малой.

4. При моделировании узлов расчетной схемы следует учитывать неразрезность вант, если она имеет место в реальной конструкции.

Список литературы

1. Завьялова О. Б. Применение метода сеточной аппроксимации элементов для расчёта сжато-изогнутых железобетонных стержневых элементов и конструкций. Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 2 (42). С. 91–98.

2. Завьялова О. Б., Шеин А. И. Расчёт быстровозводимых монолитных железобетонных каркасов с учётом физической нелинейности, твердения и ползучести бетона. Строительство и реконструкция. 2014. № 4 (54). С. 11–16.

3. Шеин А. И., Завьялова О. Б. Влияние физической нелинейности бетона на напряженно-деформированное состояние элементов монолитных железобетонных рам, рассчитываемых с учетом истории нагружения. Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 29–31.

4. Синельщиков А. В. Численные методы нелинейного динамического анализа грузоподъемных кранов / Известия ТулГУ. Сер. «Подъемно-транспортные машины и оборудование». Вып. 4. Тула: Изд. ТулГУ, 2003. С. 77–84.