

Моделирование напряженно-деформированного состояния вантового пролета конструкций, служащих опорой линии газопровода

Л.Н. Панасюк, В.С. Тюрина, К.А. Пастарнак

Донской Государственный Технический Университет

Аннотация: В статье представлены описание расчетной модели и некоторые результаты моделирования напряженно-деформированного состояния вантовых конструкций с учетом динамического воздействия. Отражены некоторые аспекты моделирования общей потери устойчивости в геометрически нелинейной постановке.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, вантовая конструкция, геометрическая нелинейность, гибкая вантовая система, пространственная стержневая система.

Висячий однопролетный вантовый переход через реку Энжерук запроектирован с основным пролетом $L=164\text{м}$, начальная стрела провеса $f=15\text{м}$ [1-3]. С одной стороны несущий трос подвешен к пилону (выполняется по схеме «качающейся опоры»), закрепленному пятью оттяжками. С другой стороны – непосредственно растяжками прикреплен к неподвижной массивной опоре пятью оттяжками. Оттяжки несущего каната располагаются на расстоянии 27 и 41м от оси пилона и несущего каната [4, 5]. Полная схема одноцепного перехода представляется в виде 27+164+41м с 4-я несущими канатами диаметром 38мм. На пролетной части висячего перехода прокладывается стальная прямошовная труба газопровода диаметром 325x9мм. Пролетная часть висячего перехода крепится к несущим канатам с помощью подвесок переменной длины из круглой стали диаметром 24мм с шагом 5м. Для восприятия боковых ветровых и сейсмических нагрузок пролетная часть расчаливается 6-ю парами оттяжек с диаметром каната 19мм под углом к горизонтальной поверхности и к оси трубопровода. Также парой поперечных диагональных оттяжек диаметром 19мм крепится пилон первой опоры от ветра и сейсмических нагрузок. Под газовой трубой проложен монорельс (двутавр № 18), по которому может перемещаться монтажная тележка для обслуживания газопровода.

Расчетная схема – пространственная стержневая система [6, 7]. Работа пилонов, трубопровода, монорельса и основного каната моделировалась пространственными геометрически нелинейными (теория третьего порядка) стержневыми элементами. Несущие и ветровые оттяжки пилонов, а также вертикальные элементы подвеса трубы к несущему тросу моделировались стержневыми элементами типа «вант» с учетом односторонней работы (только на растяжение). При моделировании опор пренебрегаем осадкой фундаментов, устраиваемых в жестком скальном основании.

Высокая гибкость конструкции, а также зависимость общей жесткости от достигнутых деформаций обуславливает необходимость учета этапности возведения. Для реализации этого эффекта построение полной модели системы должно проводиться в несколько этапов.

На первом этапе рассматривается расчет троса на собственный вес. Приблизительно задается форма провеса и выполняется итерационный нелинейный расчет по уточнению провеса от собственного веса. В конце этапа определена геометрия несущего троса, деформация от собственного веса и усилия в тросе. На втором этапе корректируется геометрия троса и к его элементам добавляются усилия предварительного напряжения, определенные как усилия в тросе при его расчете на собственный вес. На третьем этапе строится полная расчетная схема сооружения. Этот этап можно считать окончательным в построении топологии модели (рис. 1-2).

Параметры расчетной модели – 1146 конечных элементов, 1034 узлов, порядок системы разрешающих уравнений 6204, нагружений 17, комбинаций нагружений 23.

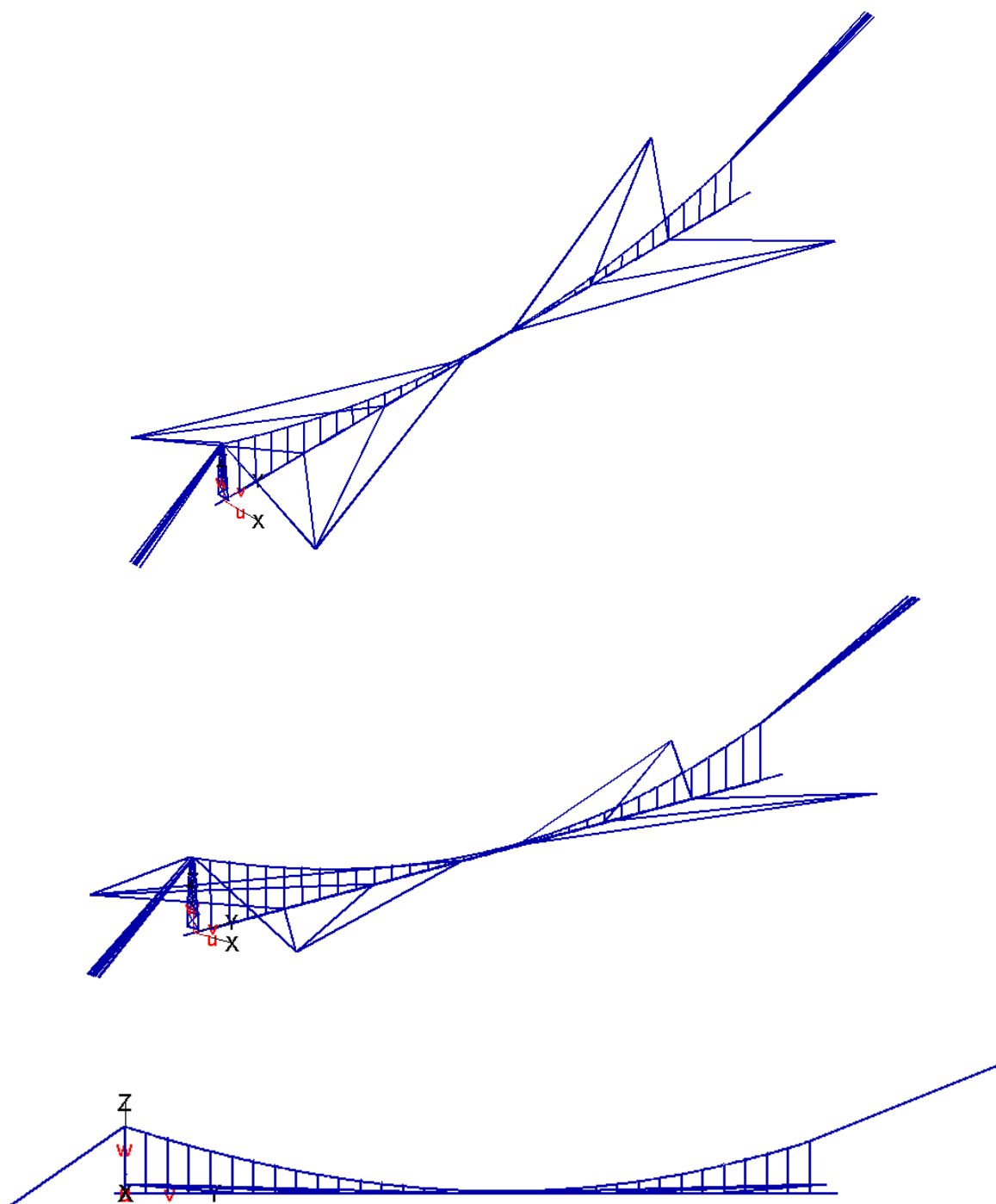
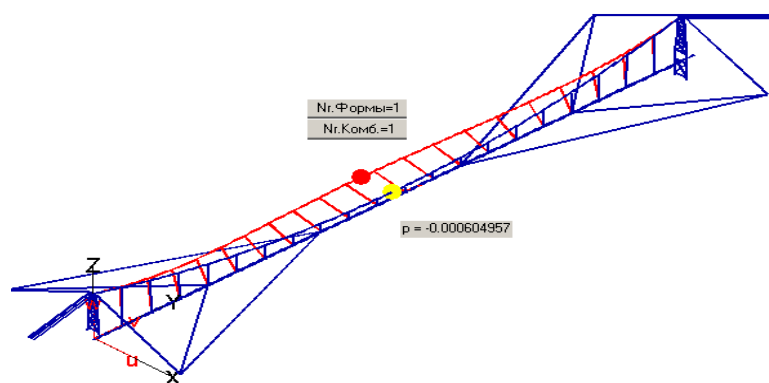


Рис.1. – Пространственные виды конечно-элементной модели перехода

Т.к. выполняется расчет в нелинейной постановке, то нельзя использовать алгоритм определения расчетных сочетаний усилий [8-10]. Для получения диапазона изменения усилий в элементах конструкции необходимо выполнить серию отдельных расчетов на разные комбинации нагрузжений.

Особый интерес представляет расчет на общую потерю устойчивости. Для гибких вантовых систем «стандартные», предусмотренные в программных комплексах методы определения критической нагрузки общей потери устойчивости часто не приводят к искомому результату. Более того, получаемые в стандартном расчете результаты достаточно абсурдны. Действительно, полученные значения критического параметра нагрузки – небольшие по модулю *отрицательные* числа. Т.е. по стандартному расчету потеря устойчивости должна происходить при противоположных направлениях нагрузки. Однако, это вполне закономерный результат стандартного расчета. Дело в том, что в алгоритме расчета на общую нелинейную потерю устойчивости на параметр нагрузки умножаются *все* нагрузки в комбинации, в том числе и собственный вес. Согласно алгоритму нелинейного расчета определяется *минимальный* параметр нагрузки, при котором система становится неустойчивой. Минимальным по модулю является наиболее близкий к нулю отрицательный параметр нагрузки. При этом вертикальные тязи, связывающие трубу и несущий трос, начинают работать на сжатие. Т.к. в модели предусмотрена односторонняя работа тязей только на растяжение, то при появлении сжимающих напряжений подвески выключаются из работы. Трос начинает работать изолированно от трубы. Его собственный вес троса становится отрицательным, основные напряжения становятся сжимающими, что и определяет общую потерю устойчивости при отрицательном значении параметра нагрузки (рис. 2).



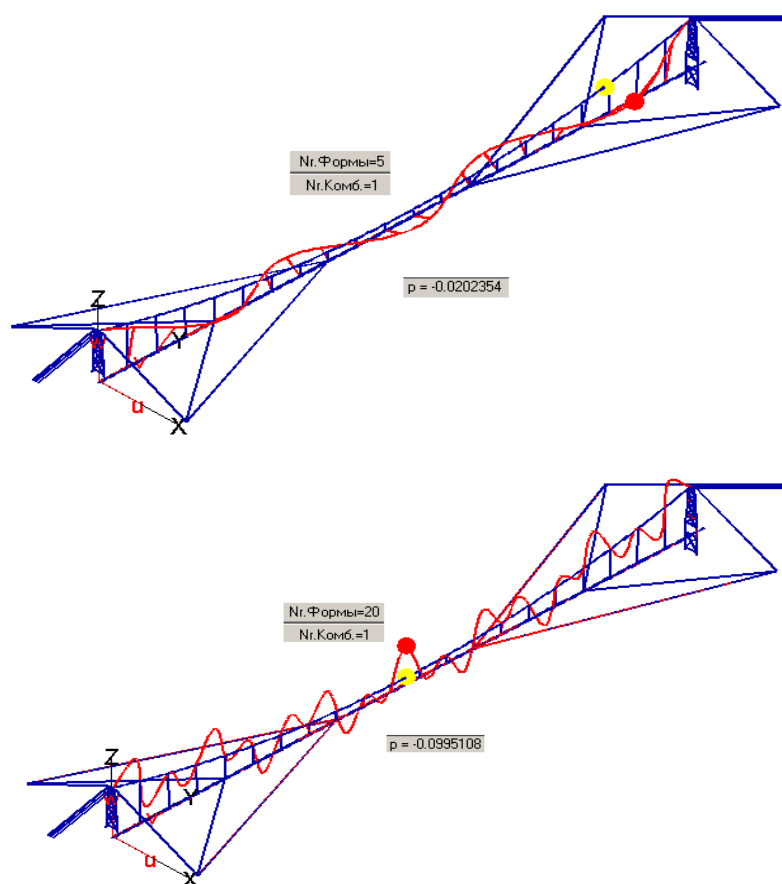


Рис.2. – Примеры форм потери устойчивости при «стандартном» нелинейном расчете

Для устранения этого эффекта достаточно относить параметр ко всем нагрузкам, за исключением собственного веса конструкции. Например, при расчете устойчивости на ветровую нагрузку нужно постепенно увеличивать только ветровую нагрузку. В результате получим, во сколько раз следует увеличить значение ветровой нагрузки, чтобы система потеряла устойчивость.

Критерием потери устойчивости является сингулярность функционала полной потенциальной энергии Лагранжа. При переходе через точку бифуркации вторая вариация функционала Лагранжа равна нулю, что приводит к вырожденной касательной матрицы жесткости. Практически получить точное значение параметра невозможно, поэтому в закритической

точке касательная матрица содержит отрицательные диагональные элементы, что и будет являться численным критерием перехода через точку потери устойчивости.

На рис. 3-7 показаны некоторые результаты моделирования работы вантового перехода.

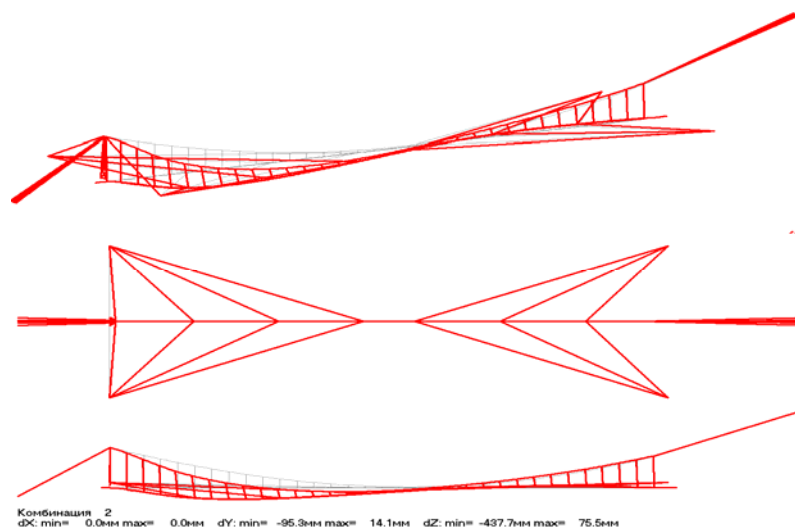


Рис.3. – Деформации конструкции - комбинация 2 (вес несущих конструкций и воздействие от подвесной конструкции для обслуживания перехода)

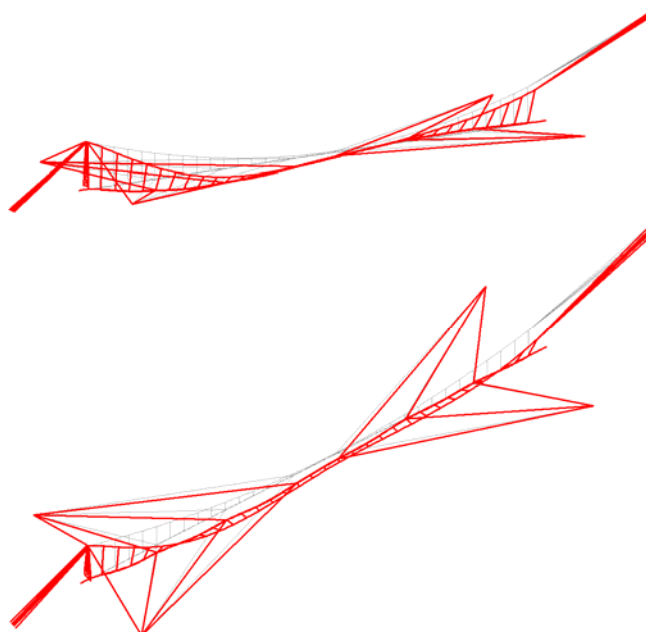


Рис.4. – Деформации конструкции - комбинация 21 (собственный вес и сейсмическое воздействие)

- Максимальный прогиб 405мм возникает при равномерном нагреве. Он обусловлен естественным удлинением несущего троса.
- Прогиб 400мм возникает при действии монтажной тележки.
- Прогиб 376мм возникает при сейсмическом воздействии по первому опасному направлению.
- Максимальные прогибы без учета температуры 400мм –воздействие ремонтной тележки в центре пролета и 376мм при действии сейсмической нагрузки.
- Относительно исходного монтажного состояния (прогиб под действием собственного веса 280мм) максимальные дополнительные прогибы от ветровой нагрузки 125.
- Максимальные горизонтальные смещения из плоскости конструкции 1530мм и 1455мм – при колебаниях конструкции от ветрового воздействия. При сейсмических воздействиях максимальные горизонтальные смещения 315мм.
- Максимальные смещения верха пилонов: пилон 1 – 18.3мм (сейсмика) и пилон 2 – 20мм (сейсмика). Отклонение по горизонтали центральной части 63мм – ветровое воздействие.

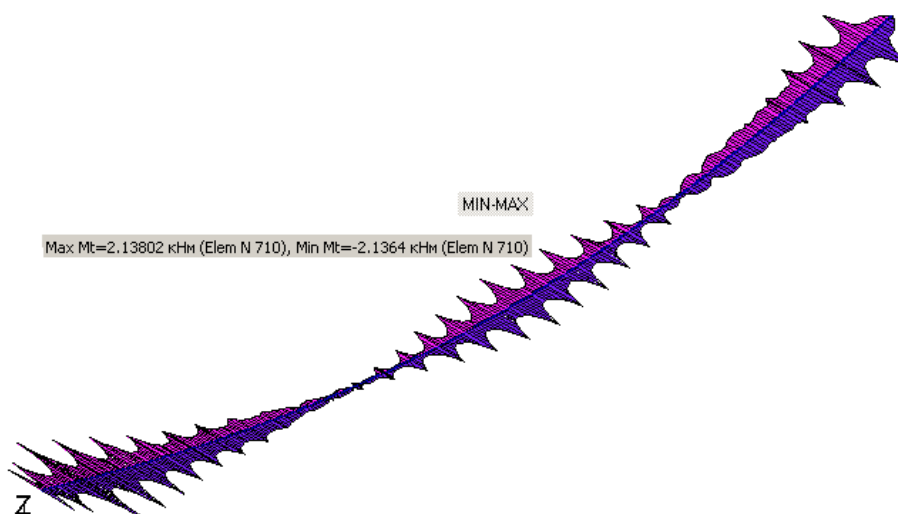


Рис.5. – Огибающие эпюры изгибающего момента в несущем тросе

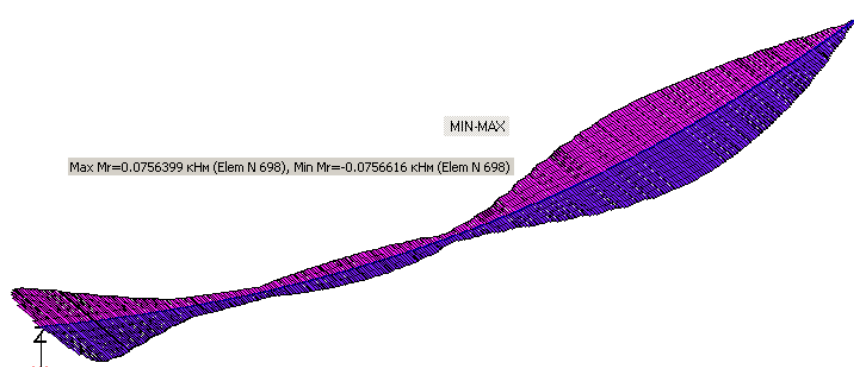


Рис.6. – Огибающие эпюры крутящего момента в несущем тросе

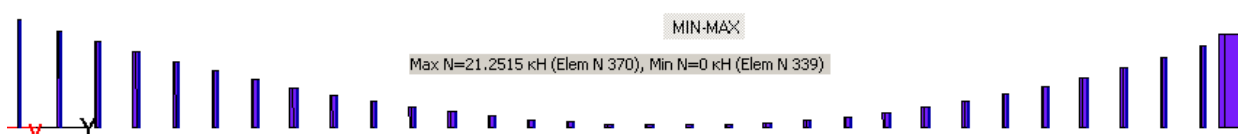


Рис.7. – Огибающие усилия в элементах вертикальной подвески

Литература

1. Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. Кучеренко). Рекомендации по проектированию висячих конструкций. Москва: 1973. 177 с.
2. Recupero Antonino, Longo Giuseppe, Granata Fabio Michele Structural analysis of cable-stayed structures in the construction sequence of bridges built by cantilevering // International Journal of Bridge Engineering (IJBE), Special Issue. 2016. Pp. 71-96.
3. Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hautzinger St.J.. Design considerations in cable-stayed roof structures, North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction (March 2004). Pp. 75-84.
4. Нугуманова А.Д., Кашеварова Г.Г. Расчет вантовых конструкций на примере оттяжек мачты // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. №3. с 103-110.
5. Евзеров И.Д., Лазнюк М.В., Ниолова Т.А. Расчет и проектирование мачт на оттяжках // Металлические конструкции. 2009. №1. с 23-29.

6. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье: Изд-во журнала «Світгеотехніки», 2009. 400 с.
7. Панасюк Л.Н. Прямые методы решения нестационарных задач теории сооружений: дис. д-р. техн. наук: 05.23.17. Ростов-на-Дону, 1996. 389 с.
8. Чубка Ю.Ш., Тюрина В.С., Панасюк Л.Н. Решение задач в постановке нелинейной наследственности // Инженерный вестник Дона, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3742
9. Панасюк Л.Н., Чубка Ю.Ш., Тюрина В.С., Пошев А.У-Б. Прогнозирование накопления остаточных деформаций в строительных конструкциях// Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4645
10. Сухов М. Ф., Кожанов Д. А. Нелинейные задачи строительной механики. – Н. Новгород: ННГАСУ: Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т, 2017. 66 с.

References

1. Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut stroitel'nyh konstrukcij im. V.A. Kucherenko (CNIISK im. Kucherenko). Rekomendacii po proektirovaniyu visyachih konstrukcij [Recommendations for the design of hanging structures]. Moskva: 1973. 177 p.
 2. Recupero Antonino, Longo Giuseppe, Granata Fabio Michele. International Journal of Bridge Engineering (IJBE), Special Issue. 2016. pp 71-96.
 3. Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hautzinger St.J. Design considerations in cable-stayed roof structures. North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction (March 2004). pp. 75-84.
 4. Nugumanova A.D., Kashevarova G.G. Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura. 2015. №3. Pp. 103-110.
-



5. Evzerov I.D., Laznyuk M.V., Niolova T.A. Metallicheskie konstrukcii. 2009. №1. Pp. 23-29.
6. Klovanich S.F. Metod konechnyh elementov v nelinejnyh zadachah inzhenernoj mekhaniki. [Finite element method in nonlinear problems of engineering mechanics]. Zaporozh'e: Izd-vo zhurnala «Svitgeotekhniki», 2009. 400 p.
7. Panasjuk L.N. Prjamyje metody reshenija nestacionarnyh zadach teorii sooruzhenij [Direct methods for solving nonstationary problems of the theory of structures]: dis. d-r. tehn. nauk: 05.23.17. Rostov-na-Donu, 1996. 389 p.
8. Chubka Ju.Sh., Tyurina V.S., Panasjuk L.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3742
9. Panasjuk L.N., Chubka Ju.Sh., Tyurina V.S., Poshev A.U-B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4645
10. Suhov M. F., Kozhanov D. A. Nelinejnye zadachi stroitel'noj mekhaniki. [Nonlinear problems of construction mechanics]. N. Novgorod: NNGASU: Nizhegor. gos. arhitektur. - stroit. un-t, 2017. 66 p.