

Управление поведением несущих конструкций с применением упругоподатливых соединений

А.И. Данилов

Московский государственный строительный университет (МГСУ)

Аннотация: Рассматривается вопрос управления поведением стальных балочных конструкций перекрытий в процессе эксплуатации сооружения. Процесс управления в рассматриваемом примере ограничивается введением упругоподатливого соединения узлов опирания балки на стадии возведения. Упругоподатливые соединения являются промежуточным звеном между идеальным шарниром и абсолютно жёстким примыканием концов пролёта балки к основным несущим конструкциям и могут обеспечивать эффективное конструктивное решение соединения элементов из любых материалов при реальном снижении их напряженно-деформированного состояния. Применение упругоподатливых соединений может оказаться эффективным решением для прогонов покрытий и перекрытий, в несущих конструкциях стальных одноэтажных и многоэтажных каркасов, многопролетных балочных конструкциях. Этот подход в принципе применим и для балочных конструкций сквозного сечения. Например, стропильных ферм покрытий многопролетных зданий. Следует отметить, что как раз в конструкциях таких узлов в растянутых зонах могут найти эффективное применение полимерные материалы, например, на основе высокопрочного стекло- или углеволокна.

Ключевые слова: управление поведением конструктивной системы, узлы стальных конструкций, упругоподатливые соединения, жёсткость соединения, аналитическое решение, метод конечных элементов, высокопрочное волокно.

Введение

В процессе развития технологии проектирования строительных конструкций постепенно развивалась и находила применение и концепция пассивного и активного управления поведением конструктивных систем путём регулирования распределения усилий в элементах путём перераспределения жесткостных характеристик, формирования требуемого начального напряженно-деформированного состояния (далее НДС) системы (например, предварительное напряжение), планирование поведения материала, управление изменением конфигурации системы и характером взаимодействия её составляющих на разных стадиях её жизненного цикла. Понимание жизненного цикла строительного объекта как многостадийного процесса появилось и внедрилось в принципы проектирования достаточно

давно. Однако, при этом на практике применяется в основном традиционный подход к рассмотрению эксплуатации конструкций не как процесса, в котором управление параметрами конструкции является естественным фактором, а как последовательности её состояний в некоторые отдельные моменты, что по сути заложено и в основных положениях норм проектирования.

Примеров пассивного управления можно привести огромное количество, поскольку само проектирование в принципе основано на прогнозировании поведения конструкций в различных условиях эксплуатации. Активное управление на первый взгляд представляется чем-то менее очевидным. Однако, достаточно вспомнить, например, о разводных мостах, регулируемом натяжении вантовых конструкций, регулировки НДС элементов предварительного натяжения (например, ежегодное регулирование натяжения канатов в Останкинской телебашне), наконец о регулярных обследованиях конструкций и мероприятиях по ремонту и восстановлению строительных объектов и становится понятно, что активное управление реально играло и играет существенную роль в процессе эксплуатации. Причём субъектной составляющей здесь является, как правило, человеческий фактор. В представленной работе рассматривается пример пассивного управления поведением балочных конструкций для повышения эффективности их эксплуатации.

Общие сведения по теории систем, вопросам управления и моделирования можно найти, например, в [1]. Вопросы управления поведением несущих строительных конструкций с конкретными примерами реализации рассматриваются в [2]. В [3] рассматривается проблема управления поведением несущих строительных конструкций на стадии разрушения, в работе [4] - анализ современных тенденций проектирования высотных зданий, в [5-6] - результаты экспериментальных исследований

повеления клеевых соединений, в [7] применяются аналитические и численные методы исследования проблем применения полимерных фиброармированных материалов для усиления металлических конструкций, в работах [8-10] рассматриваются различные аспекты применения углепластиков для усиления и временного восстановления стальных элементов.

Материалы и методы

Практическая реализация любых понятий или концепций так или иначе не может не сосредоточиться на поисках конкретных эффективных решений применительно, в том числе, и к относительно традиционным задачам, то есть, к получению в конечном итоге экономического эффекта, который, собственно, в значительной мере и определяет эффективность того или иного проектного решения.

Одна из таких ставших традиционными проблем – это снижение металлоёмкости балочных перекрытий. Как наиболее видимый признак нерациональности применяемых конструктивных решений, вполне естественно рассматривать неравномерность распределения НДС по длине балки, как правило, в соответствии с распределением изгибающих моментов даже при ставшей стандартом для общего расчёта балок равномерно распределенной нагрузке. В результате, подавляющая часть пролёта конструкции находится в почти не загруженном или мало загруженном состоянии, а максимальное использование несущей способности происходит в отдельных весьма ограниченных зонах. В связи с этим, достаточно давно применяются балки переменного сечения с изменением ширины и/или высоты сечения по длине балки в том числе с применением, в сущности, локальных усилений, например, в виде вутов. Практика показывает, что такие решения не всегда оказываются достаточно эффективными, хотя и требуют дополнительных затрат. Наиболее экономичным часто остаётся

применение прокатного профиля постоянного по длине пролёта сечения. При этом нерациональный расход стали в значительной мере компенсируется относительной простотой технологии изготовления и монтажа и удобством транспортировки.

Существенным фактором является мотивация выбора применения простых (шарнирных) опираний, или жёстких сопряжений в узлах соединения ригелей с колоннами (рамные и связевые решения). Важное значение может иметь принятие решения о применении разрезных или неразрезных балок. Каждое такое решение имеет свои плюсы и минусы. Хотя, конечно, нельзя не отметить существенные технологические и эксплуатационные преимущества простых (безмоментных) сопряжений. Жёсткие и шарнирные сопряжения стержневых элементов в теоретическом плане являются экстраполярными решениями, но и то и другое – по сути, идеализация, на самом деле в различной степени не реализуемая практически, что достаточно очевидно и не требует подробного обсуждения. То есть на самом деле практически все узлы включают податливые, хотя и не обязательно упругоподатливые соединения (далее УПС). Иногда это так или иначе учитывается при проектировании конструкций. Например, для сдвигоустойчивых соединений могут рассматриваться две стадии работы, когда сдвиг отсутствует и когда сдвиг все-таки происходит и к силе трения добавляется сопротивление элементов соединения срезом и смятию. Однако, в большинстве случаев для учёта особенностей действительной работы элементов конструкций вообще и их соединений в частности, требуется расчёт конструкций в нелинейной постановке, даже если речь не идёт о геометрической или физической нелинейности. Последняя давно и весьма эффективно (порядка 10%) реализуется путём учёта в допустимых условиях ограниченного развития пластических деформаций в наиболее нагруженных сечениях изгибаемых элементов. Могут также применяться конструктивно

нелинейные модели с включением и выключением из работы назначенных элементов на разных стадиях работы конструкции.

Возможным решением проблемы выравнивания НДС по длине пролёта является регулирование распределения внутренних усилий, из которых для изгибаемых элементов доминирующим, как правило, является изгибающий момент в плоскости поперечного изгиба. Например, для простой балки пролётом L под действием равномерно распределенной нагрузки q можно выписать несколько хорошо известных из курса сопротивления материалов соотношений. Распределение изгибающего момента по длине пролёта для балки с простым опиранием (шарниры по концам):

$$M(x) = \frac{qL}{2} \cdot x - \frac{qx}{2} \cdot x = \frac{qL}{2} \cdot x - \frac{qx^2}{2}; \quad M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{qL^2}{8}$$

Поскольку $M(x) = EJ \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{qL}{2} \cdot x - \frac{qx^2}{2}$, то $EJ \frac{dy}{dx} = \frac{qL}{2} \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{qx^3}{6} + C$

Из условия $EJ \frac{dy}{dx} = \frac{qL}{2} \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{qx^3}{6} + C = 0$ следует $C = -\frac{qL^3}{24}$

Тангенс угла поворота опорного сечения при простом опирании на левой опоре (при $x=0$):

$$\frac{dy}{dx} = C/EJ = -\frac{qL^3}{24EJ}$$

При пролёте 9 м, нагрузке 20 кН/м для балки сечением 30Б1 это составляет - 0.0466, то есть около 2.7° . Это соответствует перемещениям точек верхней грани сечения относительно нижней около $300 \times 0.0466 = 14$ мм.

Распределение изгибающего момента по длине пролёта для балки с жёсткими сопряжениями по концам (справа – подвижное защемление):

$$M(x) = -\frac{qL^2}{12} + \frac{qL}{2} \cdot x - \frac{qx^2}{2}; \quad M(0) = M(L) = -\frac{qL^2}{12}; \quad M\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{qL^2}{24}$$

Средняя величина этих значений - $(1/12 + 1/24) / 2 = 1/16$: $M_{cp} = qL^2/16$.

Снижение расчётного значения изгибающего момента до $M_{\text{ср}}$ составляет по сравнению с простым опиранием 50%, по сравнению с жёстким защемлением концов - 25%. На столько же процентов снижается нагрузка на соединительные элементы УПС по сравнению с защемлением.

Остаётся определить требуемую жёсткость УПС, которая связана с углом поворота опорного сечения, то есть, при малых деформациях, с первой производной от выражения для зависимости прогибов от координаты точки в пролёте.

В частном случае балки с постоянной по длине пролёта жесткостью EJ и при равномерно распределенной нагрузке из приведённых выше соотношений следует выражение для коэффициента жёсткости:

$$c = k \cdot \frac{EJ}{L} = 6 \cdot \frac{EJ}{L}$$

Характерно, что этот коэффициент пропорционален погонной жёсткости стержня EJ/L и не зависит от величины нагрузки (однако, по форме - равномерно распределенной, форма нагрузки влияет на значение k). Полученное значение множителя к погонной жёсткости $k = 6$ может быть использовано как «исходная точка» при поиске аналогичных решений для более сложных и несимметричных схем поперечных нагрузок с определением для каждой опоры своего коэффициента как решения оптимизационной задачи поиска наиболее благоприятного распределения изгибающего момента по длине пролёта.

Результаты

В качестве численного примера можно получить решение, например, для балки сечением 30Б1 ($E = 20600 \text{ кН/см}^2$, $J = 6328 \text{ см}^4$) на пролёте 9 м (900 см). Для проверки сечения можно использовать и некоторую реальную величину распределенной нагрузки, например, 20 кН/м.

Коэффициент жесткости УПС (к углу поворота опорного сечения балки):

$$c = \frac{6EJ}{L} = \frac{6 \cdot 20600 \cdot 6328}{900} = 869\,045 \text{ кН} \cdot \text{см}$$

Эта величина условно соответствует значению «1» тангенса угла поворота (45°) опорного сечения. То есть при такой жёсткости соединения поворот сечения на 1° ($\text{tg} = 0.017455$) требует приложения на упругоподатливой опоре сосредоточенного момента ($8690 \text{ кН} \cdot \text{м} \cdot 0.017455 =$) 152 кН·м. При этом напряжение в опорном сечении: $M/W = 15200 / 582 = 26 \text{ кН/см}^2$.

Далее рассмотрен пример выполнения численного эксперимента в ПК ЛИРА САПР, без затрат усилий на получение аналитических выражений даже в наиболее простом случае.

Вначале проверяется коэффициент упругой податливости (жёсткости).

Рассматриваются три варианта закрепления концов левой половины пролёта симметричной нагруженной балки на опорах, рис 1.

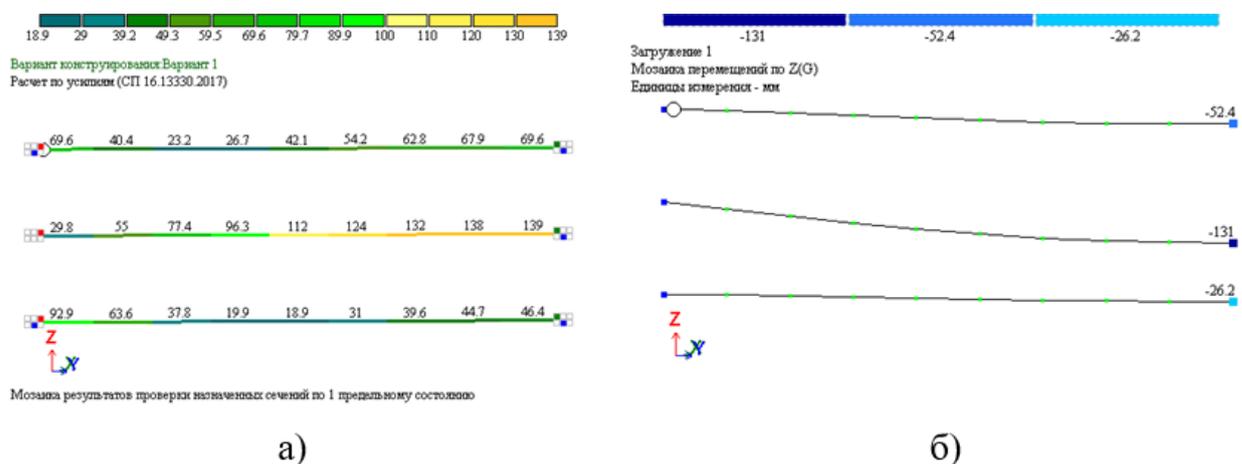


Рис. 1. Несущая способность, % (а), и максимальный прогиб (б)

Задача плоская, поэтому справа (середина пролёта 9 м) у всех балок закрепление от перемещения по горизонтали и поворота сечения вокруг оси Y. На левом конце нижней балки (рис.1.а) – защемление (узел закреплён от перемещения по Z и поворота вокруг оси Y). На левом конце средней балки –

идеальный шарнир (узел закреплён только от перемещения по Z). На левом конце верхней балки – защемление (узел закреплён от перемещения по Z и поворота вокруг оси Y), но на примыкающем к этому узлу конце конечного элемента введён упругоподатливый шарнир относительно локальной оси Y с параметром жёсткости 869045.

На рис. 2.б можно видеть, что при простом опирании требуется (по прочности) сечение 35Б2 (43.3 кг/м), при идеальном защемлении – 30Б1 (32.9 кг/м) и при упругоподатливом опирании – 26Б1 $((43.3-28) / 43.3 \times 100\% = 35.3\%$ и $(32.9-28) / 32.9 \times 100\% = 14.9\%$).

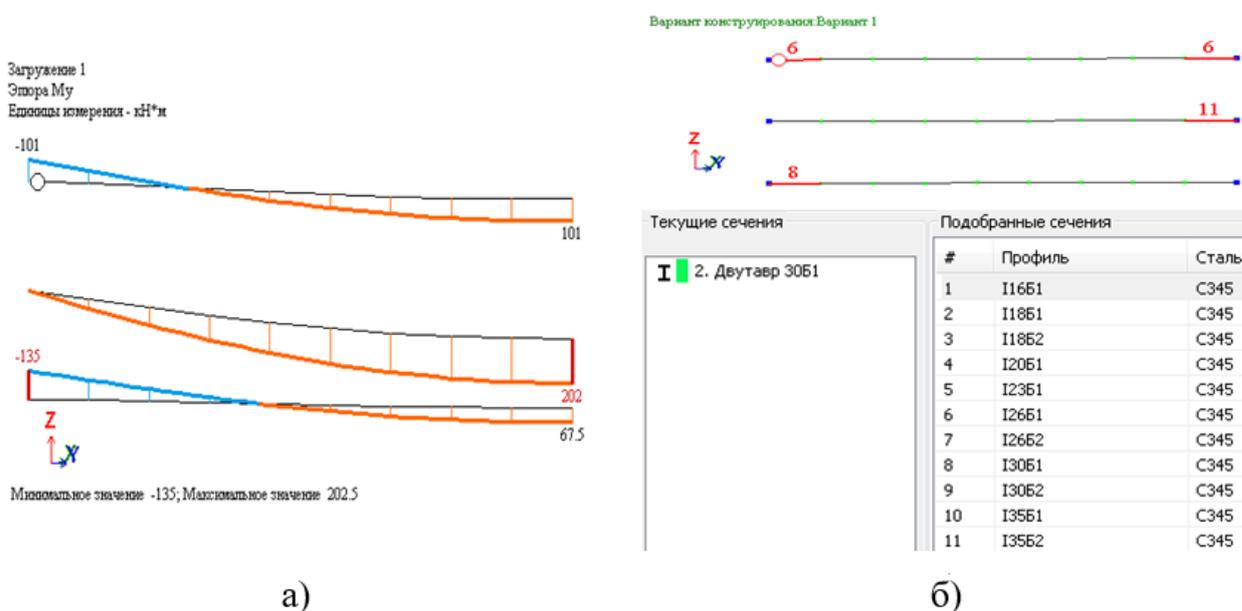


Рис. 2. Изгибающие моменты (а) и требуемые сечения (б)

Для момента 101 кН·м усилия в условных накладках на поясах в опорных узлах составляют $101 \text{ кН}\cdot\text{м} / 0.3 \text{ м} = 337 \text{ кН}$ и при $R_y = 25 \text{ кН}/\text{см}^2$ требуемые по прочности сечения накладок – порядка 15 см^2 , т.е. стальная полоса -100x16. С учётом прочности, например, углеволокна возможно многократное уменьшение площади сечения, а выбор модуля упругости волокна в сочетании с выбором площади сечения «накладки» и заданием её длины и предварительного натяжения, позволяет реализовать и обеспечение требуемой жёсткости узла. Также возможно применение, например, марок

стали со специальными механическими свойствами. Жесткость растянутого участка накладки пропорциональна также и его длине.

В этом примере не учтено усилие распора и не рассматривается второе предельное состояние. Для той же балки, но при нагрузке другой формы – сосредоточенная сила посередине пролёта - равенство пролётного и опорного моментов имеет место при идеально жёстком защемлении на опоре, и в данном случае оно оказывается «оптимальным» конструктивным решением.

В случае несимметричной нагрузки (рис. 3-4) приходится рассматривать полный пролёт балки. При этом, для каждой из опор может быть подобрано своё значение коэффициента жесткости УПС.

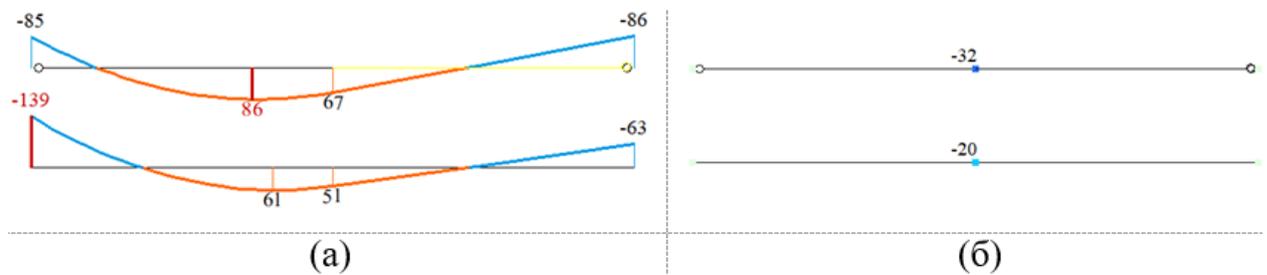


Рис. 3. Моменты (а) и максимальные прогибы (б)

При той же погонной жёсткости балки рассматривается нагрузка 30 кН/м только на левой половине пролёта балки с упругоподатливыми (верхняя) и жёсткими (нижняя) узлами, рис. 3.

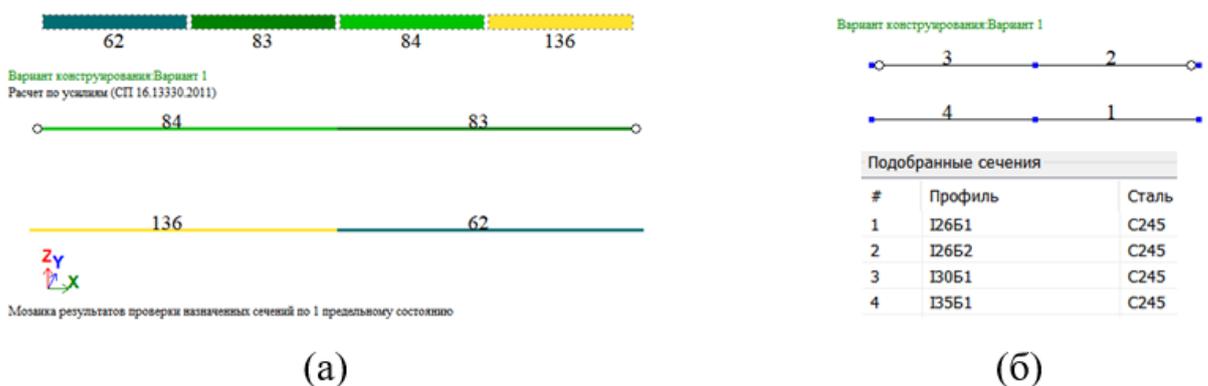


Рис. 4. Несущая способность, % (а), и требуемые сечения (б)

При погонной жёсткости стержня $30Б1$ ($20600 \text{ кН/см}^2 \times 6328 \text{ см}^4$) / $900 \text{ см} = 144\,841 \text{ кН}$ соответствующие коэффициенты имеют значения $k_{лев.} = 5.87$ на

левой и $k_{\text{прав.}} = 51.78$ на правой опоре. В данном случае требуются сечения 35Б1 при жёстких узлах и 30Б1 при упругоподатливых.

Можно обратить внимание на влияние жёсткости опорных узлов на деформации при одном и том же сечении (30Б1), рис. 3, и требуемые профили, рис. 4.

Выводы

Задача приведения изгибающего момента к минимуму имеет характер поиска оптимальной точки в двумерном, в данном случае, параметрическом пространстве и может вполне успешно решаться численно простым подбором значений параметров жёсткости узловых соединений.

Вопросы разработки вариантов эффективных конструктивных решений узлов УПС здесь не рассматриваются. Однако, практическая реализация таких узлов с применением различных современных эффективных материалов вполне возможна на основе результатов предварительного выполнения численного эксперимента.

Заключение:

1. Рассмотрен один из вариантов реализации концепции пассивного управления поведением строительных конструкций. Задача имеет оптимизационный характер и достаточно легко решается численно простым подбором значений одного - двух параметров. Критерий – достаточная близость значений абсолютных величин расчётных моментов на опорах и в пролёте.
 2. Эффективное значение коэффициента упругой податливости опорного узла пропорционально погонной жёсткости балки и определяется численно для любой формы нагрузки, её интенсивность не влияет на величину коэффициентов k_1 и k_2 жёсткостей узлов.
 3. Если погонная жёсткость меняется по длине балки, то эффективные значения коэффициентов упругой податливости для каждого из опорных
-

узлов также могут быть подобраны численно и использованы при проектировании. Эти значения в эффективном решении могут сильно отличаться на левой и правой опорах.

4. Конкретные конструктивные решения УПС могут быть получены с использованием, например, стальных изгибаемых или растянутых элементов из специальных марок стали или из полимерных материалов на основе высокопрочных волокон, применение которых здесь может оказаться перспективным.

Литература

1. Данелян Т.Я. Теория систем и системный анализ (ТСиСА): учебно-методический комплекс. М.: Изд. центр ЕАОИ. 2010. – 303 с.
2. Перельмутер А.В. Управление поведением несущих конструкций. Киев: УФИМБ. 1998 - 148 с.
3. Данилов А.И. Концепция управления процессом разрушения строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. с. 74-77
4. Иванова П.В., Григорян М.Н. Современные тенденции в проектировании и строительстве высотных зданий // Инженерный вестник Дона. 2019. №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5610
5. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования клеевого соединения элементов из стали и углепластиковых композиционных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. с. 69-73
6. Туснин А.Р., Щуров Е.О. Экспериментальные исследования стальных элементов, усиленных углепластиковыми композиционными материалами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 9. с. 25-29

7. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление растянутых элементов полимерами на основе высокопрочного волокна // Промышленное и гражданское строительство. № 12. 2018. с. 25-31
8. Tsouvalis N. G., Mirisiotis L. S., Dimou D. N. Experimental and numerical study of the fatigue behavior of composite patch reinforced cracked steel plates. *International Journal of Fatigue*, 2009. 31. 1613-1627
9. Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., and Poggi C. Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates. *Composite Structures*. 2009. 87. p. 334-343
10. Ghafoori E., Motavalli M. Flexural and interfacial behavior of metallic beams strengthened by prestressed bonded plates, *Composite Structures*. 2013. 101. p. 22-34

References

1. Danelian T.Y. Teorija system i systemniy analys [Systems theory and systems analysis]. (TS&SA): uchebno-metodicheskiy kompleks. M.: Izd. Centr EAOI. 2010. 303 pp.
2. Perelmuter A.V. Upravleniye povedeniyem nesutkich konstrulciy [Structural Behavior Control]. Kiev: UFIMB. 1998. 148 pp.
3. Danilov A.I. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2014. № 8. p. 74-77
4. Ivanova P.V., Grigorian M.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5610
5. Tusnin A.R., Schurov E.O. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2017. № 7. p. 69-73.
6. Tusnin A.R., Schurov E.O. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2017. № 9. p. 25-29.



7. Danilov A.I., Kalugin I.A. Promyshlennoje i grajdanskoje stroitelstvo. 2018. № 12. p. 25-31
8. Tsouvalis N. G., Mirisiotis L. S. Dimou D. N. International Journal of Fatigue. 2009. 31. p. 1613-1627
9. Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., and Poggi C. Composite Structures. 2009. 87. p. 334-343
10. Ghafoori E., Motavalli M. Composite Structures. 2013. 101. p. 22-34