

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/09SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/09SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Валиев Ш.Н., Маунг Маунг Вин Аунг, Шатилов И.С. Учет влияния длительных процессов на напряженное состояние бетонных конструкций вантового моста в Мьянме // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/09SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/09SATS220

For citation:

Valiev Sh.N., Maung Maung Win Aung, Shatilov I.S. (2020). Accounting for the effect of creep and shrinkage on the stress state of concrete structures of cable-stayed bridges in Myanmar. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/09SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/09SATS220

УДК 624.04

Валиев Шерали Назаралиевич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: vshn2014@gmail.com

Маунг Маунг Вин Аунг

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия
Соискатель
Аспирант
E-mail: mngmgwinag@gmail.com

Шатилов Иван Сергеевич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия
Аспирант
E-mail: vfnia_@mail.ru

**Учет влияния длительных процессов
на напряженное состояние бетонных конструкций
вантового моста в Мьянме**

Аннотация. В статье рассмотрен конечно-элементный анализ влияния длительных процессов (ползучести и усадка) бетона на конструкции вантового моста с железобетонной балкой жесткости по российским, европейским и американским нормам. Для численного моделирования использовался программный комплекс Midas/Civil, который позволил учесть упругую кратковременную деформацию и деформацию ползучести, а также изменение прочности бетона во времени. Длительные деформации в бетонных элементах могли в 1.5~3.0 раза превышать упругие деформации и наблюдались уже в первые несколько месяцев, а большая их часть происходила в течение пяти лет. В качестве объекта исследования рассматривался вантовый мост с железобетонной балкой жесткости коробчатого сечения. Для моделирования усадки и ползучести бетона были применены три расчетные модели: по российским, европейским и американским нормам.

Результаты исследования показали значительные расхождения зарубежных и российских норм учета длительных процессов в бетонных конструкциях вантовых мостов.

Процессы ползучести и усадки приводили к увеличению перемещений в железобетонной балке жесткости и пилоны. Причем с увеличением влажности окружающей среды прогиб балки жесткости уменьшался, а перемещение пилон незначительно увеличивалось. Усилия в вантах уменьшались от усадки и ползучести бетона. При этом было установлено, что потеря усилий в вантах уменьшалась с увеличением влажности окружающей среды.

Ключевые слова: вантовые мосты; пилоны; железобетонные пилоны; железобетонная балка жесткости; ванты; учет ползучести; учет усадки; длительные процессы; расчет по разным моделям

Введение

В Мьянме в последнее время довольно широко применяются вантовые мосты. Поэтому проблема оценки эксплуатационного состояния этих мостов, а также проблема определения рациональных соотношений между элементами вантовых мостов привлекает внимание исследователей и частично отражена в публикациях авторов [1; 2]. При изготовлении вантовых мостов железобетон находит весьма широкое применение в качестве материала для пилонов и балок жесткости. При всех положительных свойствах бетон железобетонных элементов подвержен деформациям усадки и ползучести, учет которых при проектировании вантовых мостовых сооружений позволит избежать неприятностей в процессе эксплуатации построенных мостов. Поэтому целью настоящего исследования является анализ влияния эффектов ползучести и усадки бетона железобетонных элементов вантового моста на его поведение, для чего применяется конечно-элементный программный комплекс Midas/Civil¹.

1. Анализ состояния проблемы

Проблеме учета влияния эффектов ползучести и усадки бетона на поведение и долговечность мостовых сооружений в последнее время уделяется достаточное внимание. Например, в статье [3] экспериментально исследуется ползучесть и усадка бетона с высокими эксплуатационными характеристиками (у нас его называют высокопрочным бетоном). Длительная работа сталебетонного неразрезного пролетного строения моста Гонконг – Чжухай в Макао с учетом ползучести и усадки бетона плиты проезжей части исследована авторами работы [4]. В статье [5] с использованием экспериментальных данных исследуются прогнозные возможности модели деформирования бетона, учитывающей эффекты ползучести и усадки. Влияние усадки и ползучести бетона на усилия в вантах экстрадозного моста исследовано в статье [6]. Работа [7] посвящена численному моделированию влияния усадки и ползучести бетона на изменение поведения предварительно напряженного железобетонного моста. Проблемы, возникающие при возведении вантовых мостов с балками жесткости из предварительно напряженных железобетонных элементов, бетон которых подвергается усадке и ползучести, обсуждаются в статье [8]. В статье [9] исследуется влияние эффекта ползучести на поведение экстрадозного моста в Китае. Причем для описания ползучести использовались четыре модели ползучести, предлагаемые китайскими, европейскими, американскими и японскими нормами. Численное моделирование производилось с использованием

¹ Расчет транспортных и гражданских сооружений, руководство по расчетам Miads/Civil. – С. 322–330.

программного комплекса Midas/Civil². В процессе исследования анализировалось влияние ползучести на перемещения и усилия в главной балке, а также на усилия натяжения вант. В результате имитационного моделирования установлено, что по истечении 30 лет эксплуатации результаты расчета, полученные при использовании моделей ползучести разных стран, сильно отличаются. Перемещения балки, рассчитанные по нормам Японии самые большие, затем идут перемещения, рассчитанные по нормам Китая и Еврокодам, а перемещения, рассчитанные по нормам США оказались наименьшими. Отличие в результатах расчета по японским и американским нормам может достигать 20 мм. В процессе расчета исследовалось влияние влажности, которое учитывалось в расчетных моделях ползучести. Оказалось, что перемещение главной балки при влажности 80 % меньше, чем при влажности 70 %, а если же влажность составляет 90 %, то перемещение, вызванное эффектом ползучести за длительное время на 50 % меньше, чем перемещение при влажности 80 %. То есть в относительно сухой окружающей среде эффект ползучести проявляется сильнее.

2. Постановка задачи

В данной работе ставится задача проанализировать влияние длительных эффектов (усадки, ползучести) на поведение вантового моста. Для численного моделирования используется программный комплекс Midas/Civil, который позволяет учесть и упругую кратковременную деформацию, и деформацию ползучести и изменение прочности бетона во времени. Кстати, заметим, что этот эффект называется старением и бетон является уникальным материалом, в котором старение приводит с течением времени к увеличению прочности бетона, так как расчетные характеристики принимаются на 29 день после изготовления бетонных конструкций, а процесс набора прочности продолжается годы [13]. Правда, справедливости ради следует сказать, что с течением времени развиваются не только процессы старения (упрочнения), но и деструкционных процессы, вызванные деградацией бетона под влиянием окружающей среды. Вопросы деградации железобетонных конструкций с учетом воздействия агрессивной эксплуатационной среды рассмотрены в монографиях [10–12].

Отметим, что экспериментальные данные свидетельствуют, что деформация ползучести в бетонных элементах является функцией длительно действующих напряжений и при равных напряжениях высокопрочный бетон испытывает меньшие деформации ползучести по сравнению с бетоном низкой прочности. Величины деформаций при ползучести могут в 1.5–3.0 раза превышать упругие деформации. Около 50 % общих деформаций ползучести происходит в первые несколько месяцев, а большая часть зависящих от времени деформаций происходит в течение пяти лет.

Ползучесть бетона меняется в зависимости от следующих факторов:

- увеличение водо-цементного отношения приводит к увеличению деформаций ползучести;
- в нагруженном бетоне ползучесть уменьшается с увеличением возраста и прочности бетона;
- деформации ползучести увеличиваются с увеличением окружающей температуры и с уменьшением влажности.

² Расчет транспортных и гражданских сооружений, руководство по расчетам Midas/Civil. – С. 322–330.

Пособие по расчету и проектированию железобетонных элементов в Midas/Civil в соответствии со СНиП 2.05.03.84* и СП 35-13330.2011 – С. 10–13.

Ползучесть бетона зависит также от многих других факторов, относящихся к качеству бетона и условиям заливки бетона таких, как тип, объем и максимальный размер заполнителя; тип цемента, объем цементного раствора, размер и вид бетонной массы; объем стальной арматуры; условия выдержки.

В данной работе для исследования влияние ползучести и усадки бетона на поведение вантовых мостов используется модель вантового моста с главным пролетом 210 метров с железобетонной балкой жесткости пролетного строения, имеющей коробчатое сечение. Для моделирования усадки и ползучести бетона используются три модели: российская (Russian по СП 35.13330.2011)³, европейская (CEB-FIB 1990)⁴ и американская (ACI 209)⁵.

В таблице 1 приведены формулы для расчета ползучести и усадки для разных моделей.

Таблица 1

Формулы разных стран для расчета ползучести и усадки

Норма	Формула для коэф. ползучести	Формула для коэф. усадки
СП 35.13330.2011 (Россия)	$\phi(t, \tau) = E_r \cdot C(t, \tau)$ $C(t, \tau) = \frac{\phi(t, \tau)}{E\tau}$	$\varepsilon_s(t_w) = k_s (w + v)^{3/2} \cdot \xi_{1s} \cdot \xi_{2s} \cdot \xi_{3s}$
CEB-FIP 1990 (Европа)	$\phi(t, \tau) = \phi_0 \beta_c(t, \tau) = \phi_{RH} \beta_{fcm} \beta(\tau) \beta_c(t, \tau)$	$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$ $\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \varepsilon_{cd,0}$ $\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$
ACI 209 (США)	$\phi(t, \tau) = \frac{(t, \tau)^{0.6}}{10 + (t - \tau)^{0.6}} \varphi(u)$ $\phi(u) = 2.35 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6$	$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{t + 35} \varepsilon_{shu}$ $\varepsilon_{shu} = 780 \gamma_{shu} \cdot 10^{-6}$

Составлено авторами

3. Методика расчетного анализа

Математическое моделирование с целью анализа влияния ползучести и усадки на поведение вантового моста проводилось на примере трехпролетного вантового моста в Мьянме пролетами 100+210+100 м с использованием программного комплекса MIDAS/Civil. Конечно-элементная схема вантового моста включает 247 узлов, 80 стержней и 162 элемента 40 гибких нитей (рис. 1). Железобетонная балка имеет коробчатое поперечное сечение площадью 8,56 м² (рис. 2). Пролетное строение крепится к пилонам через анкеры при помощи вант длиной от 26 до 108 м. Ванты сформированы из параллельных прядей диаметром 12,7 мм, каждая из которых состоит из 7 стальных оцинкованных проволок. Ванты включают в себя от 12 до 127 прядей, каждая из которых имеет индивидуальную оболочку. Вантовая система моста состоит из двух наклонных плоскостей вант. Плоскости вант веерные. С каждой стороны пилона крепится по 10 вант. Высота пилона над балкой жесткости 42 м, под балкой жесткости 20 м.

³ СП 35.13330.2011 Set of rules "Bridges and pipes. Updated Version of SNiP 2.05.03.84*" М. JSC CPP – 2011, 69 p.

⁴ Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures, part 1–1 General rules and regulations for buildings, Minks 2010 – p. 11–17.

⁵ ACI Committee 209. Prediction of creep shrinkage and temperature effects in concrete structures. Manual of concrete practice. Part 1. America Concrete Institute. 209R 1992. 8 p.

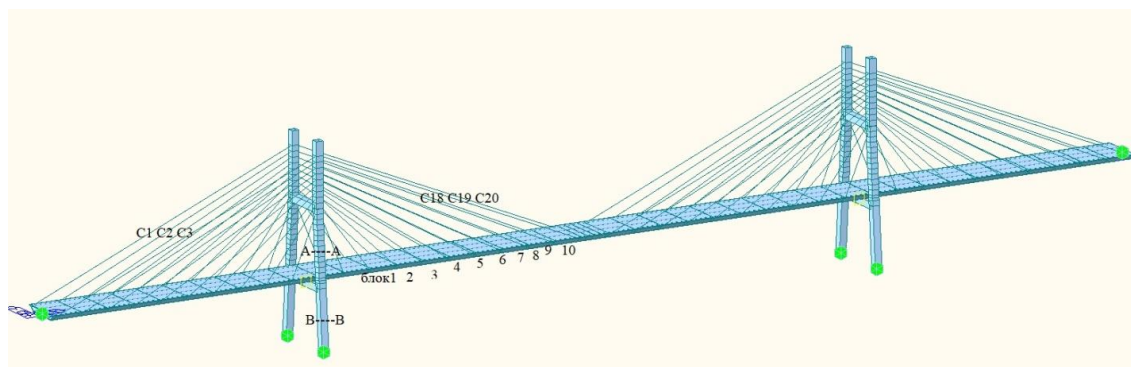


Рисунок 1. Стержневая модель железобетонного вантового моста в MIDAS/CIVIL (составлен авторами)

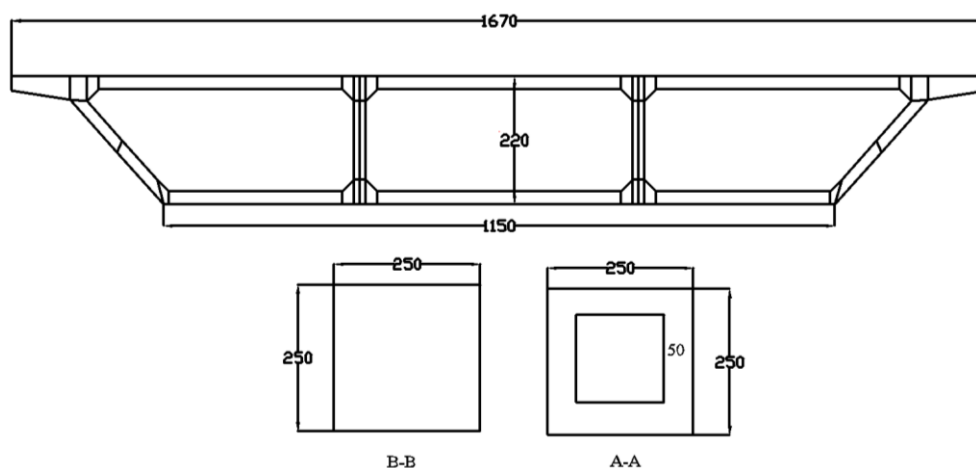


Рисунок 2. Поперечное сечение балки жесткости и пилона в размерах см (составлен авторами)

Характеристики металлических вант приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические характеристики вант

Номер вант	Диаметр (мм)	Площадь сечения (мм ²)	Номер вант	Диаметр (мм)	Площадь сечения (мм ²)
C1	120	11310	C11	80	5026
C2	120	11310	C12	80	5026
C3	110	9503	C13	90	6362
C4	110	9503	C14	100	7854
C5	110	9503	C15	100	7854
C6	100	7854	C16	110	9503
C7	100	7854	C17	110	9503
C8	90	6362	C18	110	9503
C9	80	5026	C19	120	11310
C10	80	5026	C20	120	11310

Составлено авторами

Процесс возведения вантового моста разбивался на стадии, которые приведены в таблице 3.

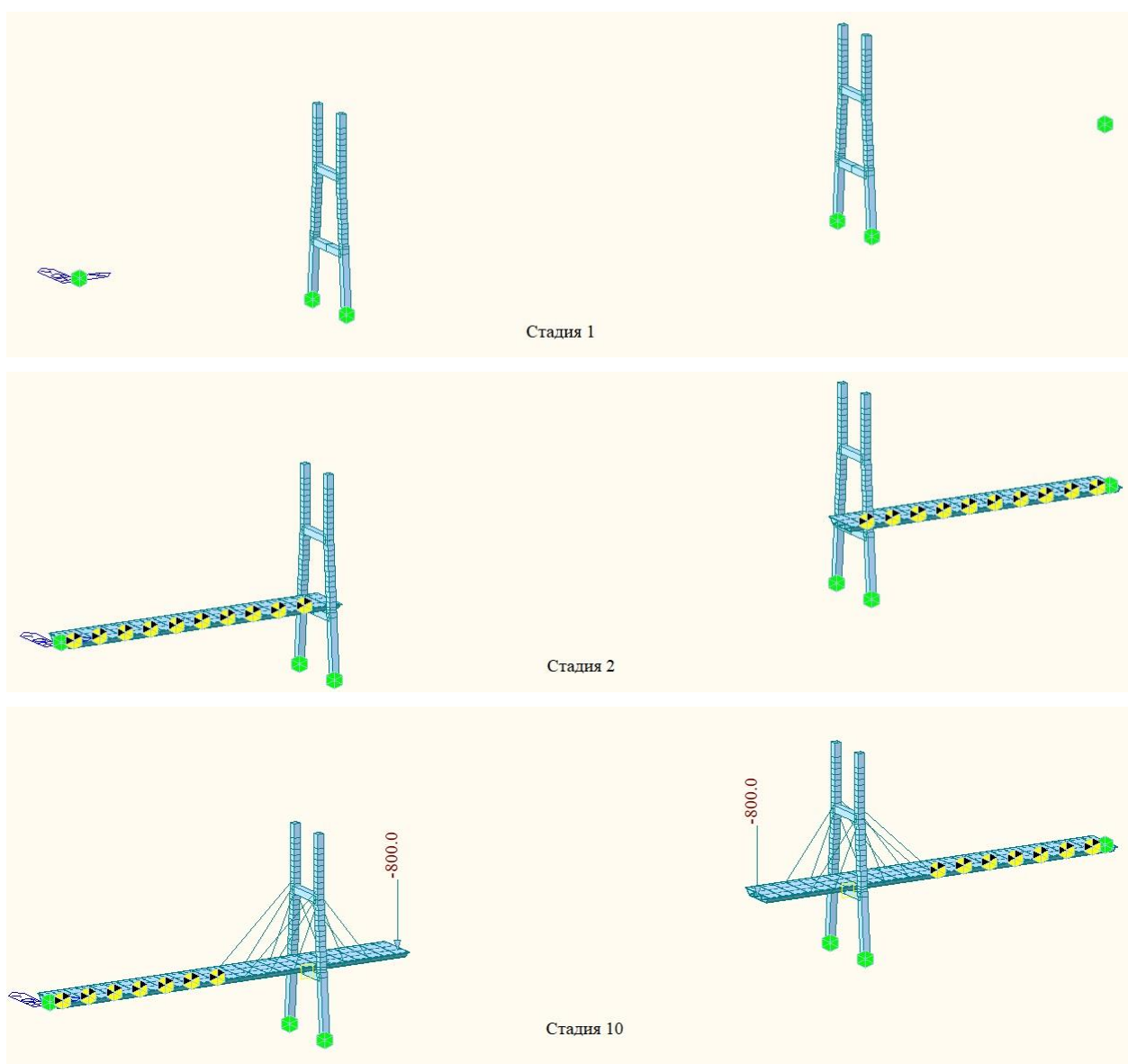
Таблица 3

Стадия строительства вантового моста

Стадия	Этапы строительства	Время (день)	Примечание
1	возведение пилонов	14 блоков*14	
2	возведение крайних пролетов в временных опорах	21 блока*14	нагрузка крана на крайних блоках
3	восстановление вант С10	2	
4-7-10-13-16-19-22-25-28-31	возведение блока 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10	10 блоков*28	перемещение агрегатов
5-8-11-14-17-20-23-26-29-32	восстановление вант С11-С12-С13- С14-С15-С16-С17-С18-С19-С20	10*2	
6-9-12-15-18-21-24-27-30	восстановление вант С9-С8-С7-С6-С5-С4-С3-С2-С1	9*2	снятие временных опор
33	замыкание пролета	14	снятие агрегатов
34	устройство дорожного покрытия	30	
	итого	854	

Составлено авторами

Некоторые стадии строительства вантового моста приведены на рисунке 3.



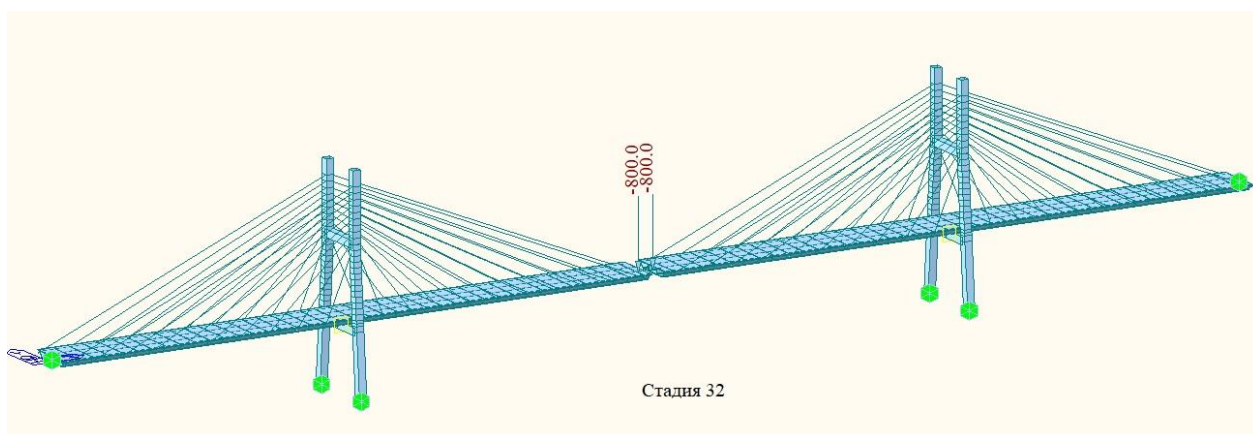


Рисунок 3. Некоторые стадии строительства моста (составлен авторами)

4. Результаты расчетного анализа и их обсуждение

Так как при моделировании поведения вантового моста с учетом усадки и ползучести бетона использовались российская (по СП 35.13330.2011), европейская (по СЕВ-FIP 1990) и американская (по ACI 209) модели, то представляет интерес сравнить изменение коэффициентов ползучести и усадки бетона по этим моделям во времени при разных уровнях влажности. Результаты расчета приведены на рисунках 4–6.

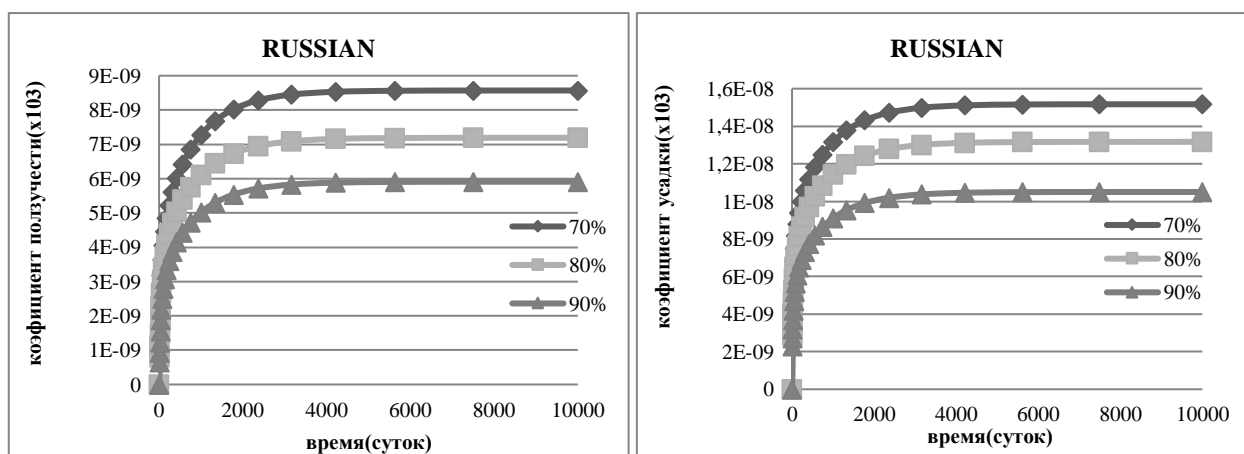


Рисунок 4. Ползучесть и усадка бетона для разных уровней влажности по Российским нормам (составлен авторами)

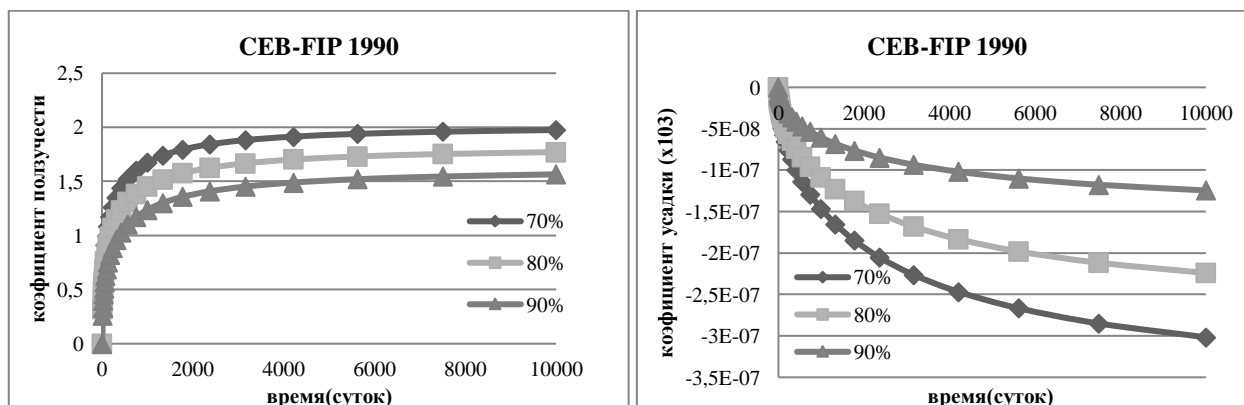


Рисунок 5. Ползучесть и усадка бетона для разных уровней влажности по Еврокодам (составлен авторами)

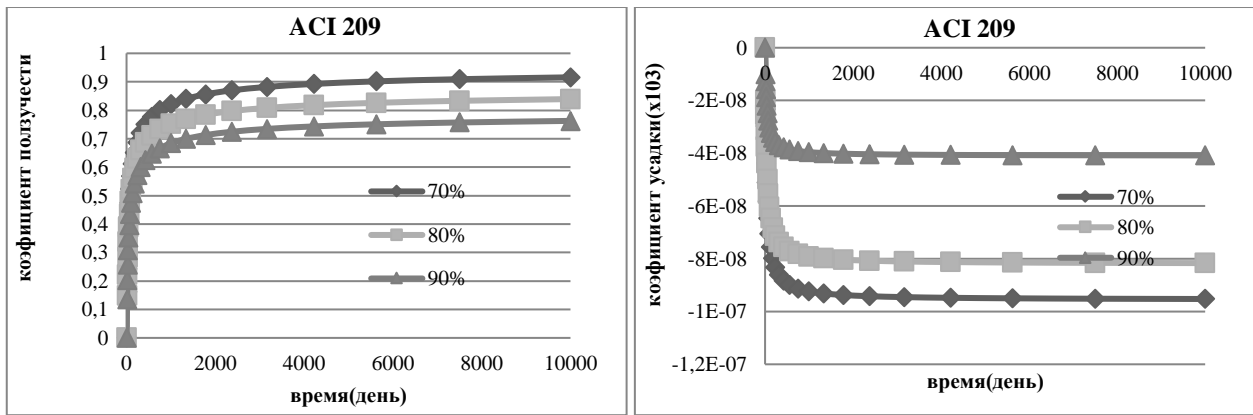


Рисунок 6. Ползучесть и усадка бетона для разных уровней влажности по Американским нормам (составлен авторами)

Анализ результатов моделирования показывает, что коэффициенты ползучести в европейской и американской моделях почти одинаковы, в российской же модели коэффициент ползучести малый. Коэффициенты же усадки в европейской и американской моделях близки, в российской же модели он имеет другой знак.

На рисунках 7–9 приведены эпюры изгибающих моментов в балке жесткости главного пролета вантового моста как без учета длительных процессов (ползучести и усадки), так и с учетом длительных процессов для разных уровней влажности (70 %, 80 %, 90 %).

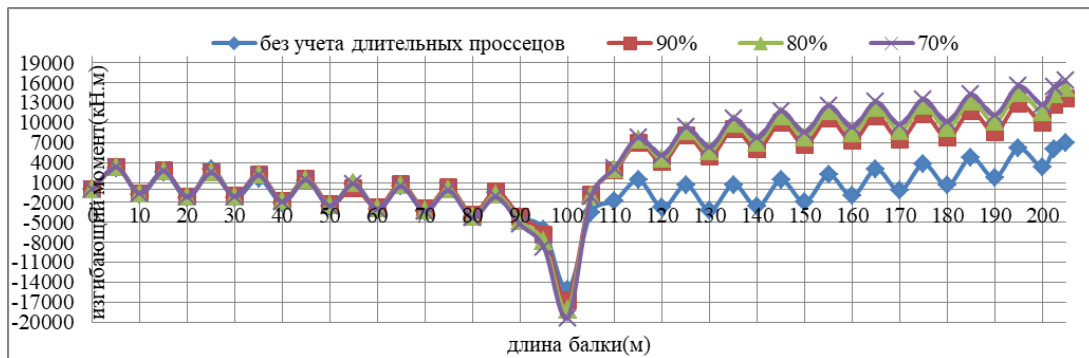


Рисунок 7. Эпюры изгибающих моментов в балке жесткости для разных уровней влажности, рассчитанные с использованием российской модели из СП 35.13330.2011 (составлен авторами)



Рисунок 8. Эпюры изгибающих моментов в балке жесткости для разных уровней влажности, рассчитанные с использованием европейской модели из CEB-FIP 1990 (составлен авторами)



Рисунок 9. Эпюры изгибающих моментов в балке жесткости для разных уровней влажности, рассчитанные с использованием американской модели из ACI (составлен авторами)

Анализ результатов расчета позволяет отметить следующее.

При использовании европейской модели из СЕВ-FIP 1990 максимальные изгибающие моменты находятся в балке жесткости в середине главного пролета и у пилона. В середине пролета балки жесткости момент увеличивается на 9,4 мНм при влажности 70 %, на 8,3 мНм при влажности 80 % и на 6,7 мНм при влажности 90 %. У опоры момент увеличивается на 4,3 мНм при влажности 70 %, на 3,1 мНм при влажности 80 % и на 1,7 мНм при влажности 90 %. Все это по отношению к величине момента без учета длительных процессов.

При использовании российской модели из СП 35.13330.2011 максимальные изгибающие моменты находятся в балке жесткости также в середине главного пролета и у пилона. В середине пролета балки жесткости момент увеличивается на 2,9 мНм при различных уровнях влажности: и 70 %, и 80 %, и 90 %. У опоры момент уменьшается на 61 кНм при всех уровнях влажности: и 70 %, и 80 %, и 90 %.

При использовании американской модели из ACI 209 максимальные изгибающие моменты находятся в балке жесткости также в середине главного пролета и у пилона. В середине пролета балки жесткости момент в балке увеличивается на 8,4 мНм при влажности 70 %, на 7,8 мНм при влажности 80 % и на 6,5 мНм при влажности 90 %. У опоры момент в балке увеличивается на 4,5 мНм при влажности 70 %, на 3,9 мНм при влажности 80 % и на 1,8 мНм при влажности 90 %.

Влияние длительных процессов (ползучести и усадки) на величину прогиба в середине главного пролета балки жесткости и перемещение верха пилона иллюстрируется данными таблицы 4, а влияние длительных процессов на величину изгибающего момента в нижнем узле пилона показано в таблице 5.

Анализ результатов расчета, представленных в этих таблицах, позволяет отметить следующее.

Прогиб балки жесткости в середине главного пролета уменьшается от ползучести и усадки на 4 см по американской, на 4 см по европейской и на 1 см по российской моделям. При изменении влажности прогиб особо не меняется.

Максимальное увеличение момента в пилоне составляет величину 1,6 МНм при влажности 70 %, 80 % и 90 % по СП 35.13330.2011.

Максимальное увеличение момента в пилоне составляет 5,2 МНм при 70 %, 5,7 МНм при 80 % и 3,7 МНм по европейской модели.

Максимальное увеличение момента в пилоне составляет 5,4 мНм при 70 %, 4,9 мНм при 80 % и 3,2 мНм по американской модели.

Прогиб пилона увеличивается от ползучести и усадки на 3 см по американской, 4 см по европейской и 1 см по российской моделям. При изменении влажности величина прогиба особо не меняется.

Таблица 4

**Влияние длительных процессов на прогиб балки
в середине главного пролета и перемещение верха пилона (см)**

	СП 35.13330.2011				СЕВ-FIP 1990				ACI 209			
	Без учета	70 %	80 %	90 %	Без учета	70 %	80 %	90 %	Без учета	70 %	80 %	90 %
В балке (Dz)	-26	-25	-25	-25	-26	-22	-23	-23	-26	-22	-22	-22
В пилоне (Dx)	3	4	4	4	3	7	7	6	3	6	6	5

Составлено авторами

Таблица 5

**Влияние длительных процессов на изгибающий
момент в нижем узле пилона у фундамента (кН.м)**

СП 35.13330.2011				СЕВ-FIP 1990				ACI 209			
Без учета	70 %	80 %	90 %	Без учета	70 %	80 %	90 %	Без учета	70 %	80 %	90 %
5664	7270	7270	7270	5664	10889	11381	9387	5664	11110	10569	8840

Составлено авторами

Влияние влажности на усилия от собственного веса моста в вантах при расчете по российским нормам СП 35.13330.2011 показано в таблице 6.

Таблица 6

Усилия в вантах (кН) от собственного веса по СП 35.13330.2011

№ вант	Стадиный анализ без учета усадки и ползучести	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 70 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 80 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 90 %
C1	3751	3745	3745	3745
C2	3699	3695	3695	3695
C3	3532	3530	3530	3530
C4	3139	3137	3137	3137
C5	3012	3012	3012	3012
C6	2727	2728	2728	2728
C7	2462	2463	2463	2463
C8	2097	2098	2098	2098
C9	1880	1878	1878	1878
C10	983	970	970	970
C11	944	919	919	919
C12	1869	1848	1848	1848
C13	2210	2189	2189	2189
C14	2453	2434	2434	2434
C15	2738	2726	2726	2726
C16	2979	2972	2972	2972
C17	3228	3229	3229	3229
C18	3503	3511	3511	3511
C19	3726	3738	3738	3738
C20	3663	3674	3674	3674

Составлено авторами

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 6, позволяет сделать такие выводы: усилия в значительном количестве вант при учете ползучести и усадки уменьшается;

максимальная потеря усилий имеет место в вантах С11, С12, С13 и С14, располагающихся ближе к пилону; из них максимальная потеря усилия 25 кН наблюдается в ванте С11, причем величина падения усилия не зависит от уровня влажности; и вообще, изменение влажности не влияет на потерю усилия в вантах.

Влияние влажности на усилия от собственного веса моста в вантах при расчете по европейским нормам СЕВ-FIB 1990 показано в таблице 7.

Таблица 7

Усилия в вантах (кН) от собственного веса по по СЕВ-FIB 1990

№ вант	Стадиный анализ без учета усадки и ползучести	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 70 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 80 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 90 %
С1	3751	3728	3730	3735
С2	3699	3684	3685	3688
С3	3532	3525	3525	3527
С4	3139	3137	3136	3137
С5	3012	3013	3013	3012
С6	2727	2728	2728	2727
С7	2462	2458	2459	2460
С8	2097	2083	2088	2092
С9	1880	1840	1851	1861
С10	983	862	887	914
С11	944	881	833	855
С12	1869	1792	1801	1809
С13	2210	2147	2152	2155
С14	2453	2401	2404	2404
С15	2738	2704	2706	2706
С16	2979	2960	2961	2961
С17	3228	3230	3230	3230
С18	3503	3522	3522	3522
С19	3726	3745	3747	3751
С20	3663	3666	3672	3683

Составлено авторами

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 7, позволяет сделать следующие выводы: усилия в значительном количестве вант при учете ползучести и усадки уменьшаются; максимальная потеря усилия наблюдается в вантах С9, С10, С11 и С12, расположенных ближе к пилону; из них максимальная потеря усилий имеет место в ванте С10 и равна 121 кН при влажности 70 %; чем больше влажность, тем меньшая наблюдается потеря усилий в вантах.

Влияние влажности на усилия от собственного веса моста в вантах при расчете по американским нормам АСІ 209 показано в таблице 8.

Таблица 8

Усилия в вантах (кН) от собственного веса по по АСІ 209

№ вант	Стадиный анализ без учета усадки и ползучести	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 70 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 80 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 90 %
С1	3751	3730	3732	3735
С2	3699	3685	3686	3687
С3	3532	3526	3526	3527
С4	3139	3138	3138	3137
С5	3012	3015	3014	3013
С6	2727	2730	2730	2729
С7	2462	2459	2459	2462
С8	2097	2080	2082	2091

№ вант	Стадиный анализ без учета усадки и ползучести	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 70 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 80 %	Стадиный анализ с учетом усадки и ползучести при влажности 90 %
C9	1880	1826	1833	1854
C10	983	834	851	896
C11	944	780	797	838
C12	1869	1786	1793	1810
C13	2210	2157	2160	2166
C14	2453	2418	2419	2418
C15	2738	2719	2719	2716
C16	2979	2970	2970	2966
C17	3228	3231	3231	3228
C18	3503	3515	3515	3515
C19	3726	3734	3735	3741
C20	3663	3658	3661	3676

Составлено авторами

Анализ результатов расчета, представленных в таблице 8, позволяет сделать следующие выводы: усилия в многих вантах от ползучести и усадки уменьшаются; максимальное падение усилий имеет место в вантах C9, C10, C11 и C12, располагающихся ближе к пилону; из низ максимальная потеря усилия наблюдается в ванте C11 и ранно 164 кН при влажности 70 %; чем больше влажность, тем меньше потери усилий в вантах.

Заключение

В процессе проведенных исследований установлено, что ползучесть и усадка в европейской модели СЕВ-FIP 1990 зависит от класса цемента, в российской модели по СП 35.13330.2011 и американской модели АСІ ползучесть и усадка бетона зависят от его типа и состав (содержания воздуха, воды, цемента, песка и щебня).

В европейской и американской моделях при уровнях влажности 70 %, 80 % и 90 % значительно изменялись усилия в балке жесткости, и в пилоне и в вантах. При использовании же российской модели влажность не оказывала влияния на изменение усилий.

Чем выше влажность окружающей среды, тем меньше увеличение моментов в железобетонных балке жесткости и пилоне. Поэтому при проектировании и расчете вантовых мостов с железобетонными пилонами и балкой жесткости для условий Мьянмы рекомендуется принимать уровень влажности равным 70 %, что будет идти в запас прочности.

Длительные процессы ползучести и усадки приводят к увеличению перемещений в железобетонных балке жесткости и пилоне. Причем с увеличением влажности окружающей среды прогиб балки жесткости уменьшается, а перемещение пилона незначительно увеличивается.

Усилия в вантах уменьшаются от усадки и ползучести бетона. При этом установлено, что потери усилий в вантах уменьшаются с увеличением влажности окружающей среды. Максимальная потеря в 164 кН имеет место в ванте C11 при влажности 70 % при расчете по американским нормам АСІ 209. Максимальная потеря в 300 кН в ванте C11 при влажности 70 % за 40 лет имеет место при расчете по европейским нормам СЕВ-FIP 1990.

Обращает на себя внимание следующий установленный в процессе имитационного моделирования факт: результаты моделирования, полученные по европейским СЕВ-FIP 1990 и американским АСІ 209 нормам не отличаются сильно друг от друга, однако результаты моделирования, полученные с использованием российских норм отличаются от других.

Понятно, что такое отличие порождается заложенными отличиями еще при моделировании поведения бетона при усадке и ползучести. Поэтому мы полагаем, что необходимы обстоятельные и экспериментальные и теоретические исследования процессов ползучести и усадки бетонов с тем, чтобы обеспечить при моделировании поведения конструкций вантовых мостов с железобетонными балками жесткости и пилонами получение более надежных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Ш.Н., Маунг Маунг Вин Аунг, Овчинников И.И. Эксплуатационное состояние вантовых мостовых сооружений Мьянмы // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/23SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/23SATS419.
2. Валиев Ш.Н., Маунг Маунг Вин Аунг, Овчинников И.И. Сравнительный анализ поведения железобетонных пилонов различной формы при статическом анализе вантовых мостов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/14SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS120.
3. Pan Zuan-feng, Meng Shao-ping. Three-level Experimental Approach for Creep and Shrinkage of High-strength High-performance Concrete // *Engineering Structures*, 2016, 120: 23–36.
4. Liu Mu-yu, Li Qian, Ultra-long Time Performance of Steel-concrete Composite Continuous Beam in Hong Kong-Zhuhai Macao Bridge with Creep and Shrinkage of Concrete Slabs // *China Journal of Highway and Transport*. 2016 (12): 61–69.
5. Han Wei-wei, Lü Yi-gang. Experimental research on prediction model of concrete shrinkage and creep // *Journal of Central South University (Science and Technology)* 2016 (10): 3515–3522.
6. Shi Jingxian Ran Zhihong. Effect of Concrete shrinkage and creep effect on the Cable Force of Extradosed Cable-stayed Bridge. *Highway engineering*. 2014 (01).
7. Xiao Yu-de, Yin Yong-gao. Numerical simulation of the component mechanical change of the prestressed concrete bridge due to shrink and creep // *Journal of Hefei University of Technology*. 2003 (02).
8. M. Schlaich. Erection of Cable-Stayed Bridges Having Composite Decks with Precast Concrete Slabs // *Journal of Bridge Engineering*. 2001.
9. Jing-Xian Shi, Zhi-Hong Ran. Calculation of Creep Effect of Extradosed Cable-stayed bridge based on Midas Civil // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 423 (2018) 012–113. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012113.
10. Овчинников И.Г., Пшеничников М.С., Раткин В.В. Моделирование ползучести железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений в агрессивных средах. Изд-во СГТУ. Саратов, 2001. 138 с.
11. Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов конструкций в условиях хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов. Научное издание. Издат. Центр «Рица». 2008. 296 с.
12. Мигунов В.Н., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. – Пенза, ПГУАС, 2014. – 352 с.
13. Седнави Гассан. Напряженно-деформированное состояние железобетонных пролетных строений мостов с учетом ползучести бетона в условиях жаркого климата. Дис. канд. техн. наук. – М., 2010. – С. 46–50.

Valiev Sherali Nazaralievich

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia
E-mail: vshn2014@gmail.com

Maung Maung Win Aung

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia
E-mail: mgmgwinag@gmail.com

Shatilov Ivan Sergeevich

Moscow automobile and road construction state technical university, Moscow, Russia
E-mail: vfnia_@mail.ru

Accounting for the effect of creep and shrinkage on the stress state of concrete structures of cable-stayed bridges in Myanmar

Abstract. The article considers the finite element analysis of the influence of time-dependent processes (creep and shrinkage) of concrete on the structures of a concrete cable-stayed bridge according to Russian, European and American standards. For numerical calculation, the Midas/Civil software was used, which allowed us to take into account elastic short-term deformation and creep deformation, as well as changes in the strength of concrete over time. Long-term deformations in concrete elements could be 1.5~3.0 times higher than elastic deformations and were observed in the first few months, and most of them occurred within five years. The object of research was a cable-stayed bridge with a reinforced concrete beam with a box girder. Three calculation models were used to model concrete shrinkage and creep: according to Russian, European and American standards.

The results of the study showed significant discrepancies between foreign and Russian standards for accounting for long-term processes in concrete structures of cable-stayed bridges. Creep and shrinkage processes led to increased displacements in the box girder and pylon. Moreover, with an increase in the humidity of the environment, the deflection of the girder decreased, and the displacement of the pylon slightly increased. The cable-forced was reduced by the shrinkage and creep of the concrete. It was found that the loss of cable forces decreased with increasing humidity of the environment.

Keywords: cable-stayed bridges; pylons; reinforced concrete pylons; reinforced concrete stiffness beam; guys; creep accounting; accounting for shrinkage; lengthy processes; calculation for different models

REFERENCES

1. Valiev Sh.N., Maung Maung Vin Aung, Ovchinnikov I.I. (2019). Operational state of Myanmar cable-stayed bridge structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/23SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/23SATS419.
2. Valiev Sh.N., Maung Maung Win Aung, Ovchinnikov I.I. (2020). The behavior of reinforced concrete pylons in the static analysis of cable-stayed bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS120.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/14SATS120.

3. Pan Zuan-feng, Meng Shao-ping (2016). Three-level Experimental Approach for Creep and Shrinkage of High-strength High-performance Concrete. *Engineering Structures*, 120, pp. 23–36.
4. Liu Mu-yu, Li Qian (2016). Ultra-long Time Performance of Steel-concrete Composite Continuous Beam in Hong Kong-Zhuhai Macao Bridge with Creep and Shrinkage of Concrete Slabs. *China Journal of Highway and Transport*, 12, pp. 61–69.
5. Han Wei-wei, Lü Yi-gang (2016). Experimental research on prediction model of concrete shrinkage and creep. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 10, pp. 3515–3522.
6. Shi Jingxian Ran Zhihong (2014). Effect of Concrete shrinkage and creep effect on the Cable Force of Extradosed Cable-stayed Bridge. *Highway engineering*, 1.
7. Xiao Yu-de, Yin Yong-gao (2003). Numerical simulation of the component mechanical change of the prestressed concrete bridge due to shrink and creep. *Journal of Hefei University of Technology*, 2.
8. M. Schlaich (2001). Erection of Cable-Stayed Bridges Having Composite Decks with Precast Concrete Slabs. *Journal of Bridge Engineering*.
9. Jing-Xian Shi, Zhi-Hong Ran (2018). Calculation of Creep Effect of Extradosed Cable-stayed bridge based on Midas Civil. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 423, pp. 012–113. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012113.
10. Ovchinnikov I.G., Pshenichnikov M.S., Ratkin V.V. (2001). Modelirovanie polzuchesti zhelezobetonnykh ehlementov konstruksiy transportnykh sooruzheniy v agressivnykh sredakh. [*Creep modeling of reinforced concrete structural elements of transport structures in aggressive environments.*] Saratov: Publishing House of the Saratov State Technical University, p. 138.
11. Marinin A.N., Garibov R.B., Ovchinnikov I.G. (2008). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh ehlementov konstruksiy v usloviyakh khloridnoy korrozii i karbonizatsii. [*Modeling the stress-strain state of reinforced concrete structural elements under conditions of chloride corrosion and carbonization.*] Saratov: Scientific publication. Publishing Center "Ritsa", p. 296.
12. Migunov V.N., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2008). Ehksperimental'no-teoreticheskoe modelirovanie armirovannykh konstruksiy v usloviyakh korrozii. [*Experimental and theoretical modeling of reinforced structures under corrosion.*] Penza: Penza State University of Architecture and Construction, p. 352.
13. Sednavi Gassan (2010). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov s uchetom polzuchesti betona v usloviyakh zharkogo klimata. [*Stress-strain state of reinforced concrete bridge spans taking into account the creep of concrete in hot climates.*] Moscow, pp. 46–50.