

Издается с апреля 1955 г.

Учредители:
НИИЖБ, ВНИИжелезобетон

СОДЕРЖАНИЕ

БЕТОНЫ

РАХМАНОВ В.А., МЕЛИХОВ В.И., САФОНОВ А.А.

Расчетно-лабораторные методы определения теплопроводности композиционного материала – полистиролбетона и его компонентов 2

КОВАЛЬ И.Г., ГРИГОРЬЕВ А.Г., ЗУБКИН В.Е.

Особенности использования добавки “Полипласт Таргет” в технологии бетонов дорожного и мостового строительства 5

В ПОМОЩЬ ПРОЕКТИРОВЩИКУ

МАТАР П.Ю., БАРКАЯ Т.Р., БРОВКИН А.В., ДЕМИДОВ А.В.

Потери предварительного напряжения в постнапряженных железобетонных конструкциях без сцепления арматуры с бетоном 10

КАРАБАНОВ Б.В. Способ расчета деформаций железобетонных конструкций без предварительного напряжения с использованием корреляционного анализа 16

СТАРИШКО И.Н. Влияние интенсивности развития напряжений и деформаций в поперечной арматуре при действии нагрузки на несущую способность по наклонным сечениям изгибаемых железобетонных элементов 20

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

ЗИНОВЬЕВ В.Н., РОМАНОВСКИЙ Д.В.

Микротрещинообразование и эффект деформационного уплотнения и разуплотнения бетона при сжатии. Часть 5. 26

НАШЕ НАСЛЕДИЕ

Лариса Алексеевна Малинина 31

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

К 85-летию М.Н. Горбовца 32

*П.Ю. МАТАР, канд. техн. наук (Ph.D.), доц. (Ливанский университет, г. Бейрут, Ливан);
Т.Р. БАРКАЯ, А.В. БРОВКИН, кандидаты техн. наук, доценты, А.В. ДЕМИДОВ, инж.
(Тверской государственный технический ун-т)*

ПОТЕРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Одним из эффективных способов снижения габаритов, материалоемкости и стоимости, а также повышения эксплуатационных характеристик монолитных перекрытий зданий является использование в них предварительно напряженной гибкой арматуры без сцепления с бетоном [1, 2]. Данный метод предварительного напряжения ("unbonded post-tensioning"), получив распространение в Европе и США, на протяжении более 60 лет зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ сооружения большепролетных перекрытий [3, 4]. Несмотря на малую распространенность данной технологии в России, все большее и большее количество объектов реализуется с применением данной системы: за последние годы возведено порядка 1 000 000 м² перекрытий с использованием предварительного напряжения в построечных условиях. Среди возведенных в нашей стране объектов, выполненных с использованием данной технологии, ТРК "ИКЕЯ" в Москве и Екатеринбурге, ТРК "РИО" в Москве, ТРК "Спартак" в Ульяновске, ТРК "ИЮНЬ" в Череповце и многие другие объекты.

Как известно, на объектах, построенных в СССР, подобные конструкции не нашли сколько-нибудь существенного применения. Этим объясняется отсутствие надежной, проверенной опытом нормативной базы, регламентирующей порядок расчета конструкций без связи арматуры с бетоном, что является одним из главных сдерживающих факторов развития постнапряженных конструкций в России сегодня. Тем не менее, перспективность применения и экономическая целесообразность постнапряжения бетона уже не вызывают сомнения ни у отечественных проектировщиков, ни у производителей работ, ни у заказчиков.

Определение потерь предварительного напряжения в арматуре – это ключевой вопрос проектирования любых преднапряженных конструкций [1, 5]. Наличие в нормах четких указаний по определению потерь – обязательное условие создания надежного и экономически целесообразного конструктивного решения.

На сегодняшний день вопросы определения потерь предварительного напряжения в конструкциях без сцепления арматуры и бетона на практике обычно решаются с применением следующих методик. Во-первых, использование зависимостей пособия к СНиП 2.03.01-84* – "Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов" [6]. Во-вторых, потери предварительного напряжения мож-

но определять, пользуясь материалами обязательного приложения РСР 35.13330.2011 "Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84" [7]. Фактически, приведенные в этом нормативе расчетные зависимости – это формулы все того же пособия к СНиП 2.03.01-84*, но с некоторой спецификой.

Многие серьезные проектные и строительные организации, постоянно работающие с технологией постнапряжения, опираются на различные зарубежные нормы. Наиболее часто применяемым зарубежным нормативом в нашей стране является DIN EN 1992-1-1-2011 "Еврокод 2. Проектирование бетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий" [8, 9]. Это действующий европейский стандарт, отражающий все вопросы проектирования как железобетонных конструкций без предварительного напряжения, так и преднапряженных.

Из доступных же зарубежных нормативов следует отметить русскоязычный стандарт республики Беларусь СНБ 5.03.01-02 "Бетонные и железобетонные конструкции", где вопрос определения потерь предварительного напряжения при натяжении арматуры на бетон освещен достаточно хорошо [10]. Кроме упомянутого выше норматива, в республике Беларусь действует еще один документ, посвященный проектированию именно конструкций с применением постнапряжения: ТКП 45-5.03-135-2009 (02250) "Железобетонные предварительно напряженные конструкции без сцепления арматуры с бетоном. Правила проектирования" [11].

Как основной нормативный документ РФ, содержащий рекомендации по проектированию предварительно напряженных конструкций – СП 52-102-2004, так и другие отечественные нормативы, ориентированы в первую очередь на конструкции с натяжением арматуры на упоры, а не на бетон [12]. И хотя в тексте этих документов нет прямых указаний на то, что приведенные расчетные зависимости не могут быть применены для конструкций без сцепления арматуры с бетоном, отсутствие многолетнего опыта применения этих методик в массовом проектировании не дает возможности получения однозначного ответа по данному вопросу.

Цель работы

Основной целью данной работы является изучение потерь предварительного напряжения арматуры в конструкциях, не имеющих связи арматуры с бетоном, и установление возможности применения рас-

четных зависимостей существующих на сегодняшний день отечественных и зарубежных строительных норм для определения потерь в таких конструкциях.

Сравнительный анализ нормативных документов и сопоставление значений потерь, полученных на их основе, с достоверными опытными данными – это, очевидно, наиболее простой путь выбора источника, в котором алгоритм освещен наиболее полно, достоверно и доступно для рядового проектировщика. Для решения поставленных задач было проведено экспериментальное исследование преднапряженных элементов, не имеющих сцепления арматуры с бетоном.

Рекомендации имеющихся нормативных документов

В данной работе использованы следующие нормы:
- СП 52-102-2004 [12]. Данный нормативный документ ориентирован на определение потерь предварительного напряжения в конструкциях с натяжением арматуры на упоры, а не на бетон. Тем не менее, методика, приведенная в этом документе, вполне соотносится с формулами других отечественных норм [6, 7], предназначенных для определения потерь в конструкциях как с натяжением на упоры, так и на бетон.

Для высокопрочной проволоки потери от релаксации напряжений в арматуре определяются по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp7} = (0,22 \frac{\sigma_{sp}}{R_{s,n}} - 0,1)\sigma_{sp} \quad (1)$$

Также СП позволяет при наличии более точных данных о релаксации напряжений арматуры принимать их за основу: так, для высокопрочной стабилизированной проволоки, согласно ГОСТ 7348-81*, величина потерь от релаксации не должна превышать 2,5% [13]. Это обстоятельство дает возможность существенно снизить расчетные потери от релаксации относительно величин, полученных по формуле (1).

Потери предварительного напряжения в арматуре от ползучести бетона определяются по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp9} = \frac{0,8\varphi_{b,cr}\alpha\sigma_{bp}}{1 + \alpha\mu_{sp}(1 \pm \frac{e_{op1}y_s A_{red}}{I_{red}})}(1 + 0,8\varphi_{b,cr}) \quad (2)$$

- СНиП 2.03.01-84* и СП 35.13330.2011 [6, 7]. В отличие от СП 52-102-2004 эти два документа рассматривают случай натяжения арматуры на бетон и приводят для вычисления потерь от релаксации напряжений зависимости, полностью идентичные формуле (1).

Потери, вызванные ползучестью бетона, согласно пособию к СНиП, следует определять по следующим формулам:

$$\sigma_9 = 128\alpha \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}}, \quad \text{при } \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} \leq 0,75; \quad (3)$$

$$\sigma_9 = 256\alpha(\frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} - 0,375), \quad \text{при } \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} > 0,75. \quad (4)$$

СП 35.13330.2011 "Мосты и трубы" предлагает схожие формулы для определения потерь, но с иными коэффициентами: 150 и 300 вместо 128 и 256 в формулах (3) и (4) соответственно.

Кроме этого, данный документ позволяет учитывать изменение потерь от ползучести бетона во времени:

$$\sigma_9(t) = (1 - e^{-0,1\sqrt{t}})\sigma_9(t \rightarrow \infty). \quad (5)$$

Следует отметить, что все отечественные методики ориентированы на раздельное определение потерь от релаксации и ползучести в зависимости от уровня преднапряжения в арматуре и обжатия в бетоне соответственно.

- СНБ 5.03.01-02, ТКП 45-5.03-135-2009 и ЕН 1992-1-1:2004 [8-11]. Первые два документа, как и послуживший для них основой Еврокод 2, выделяют потери, вызванные усадкой и ползучестью бетона, а также длительной релаксацией напряжений в арматуре, в отдельную группу реологических потерь. Потери от всех трех факторов ввиду их взаимосвязи учитываются единой формулой, которая в СНБ выглядит следующим образом:

$$\sigma_{p,c+s+r} = \frac{e_{cs}(t,t_0)E_b + \Delta\sigma_{pr}}{1 + \alpha_p \frac{A_p}{A_c} + (1 + \frac{A_c}{t_c} z_{cp}^2)[1 + 0,8\varphi(t,t_0)]} + \frac{\alpha_p \varphi(t,t_0)(\sigma_{cp} + \sigma_{cp,0})}{1 + \alpha_p \frac{A_p}{A_c} + (1 + \frac{A_c}{t_c} z_{cp}^2)[1 + 0,8\varphi(t,t_0)]} \quad (6)$$

Релаксация стали зависит от деформации бетона вследствие ползучести и усадки. В ТКП и Еврокоде данное взаимодействие дополнительно учитывается понижающим коэффициентом 0,8 перед слагаемым $\Delta\sigma_{pr}$ (абсолютное значение изменения напряжений в напрягаемой арматуре в расчетном сечении x в момент времени t , вызванное релаксацией напряжений в арматуре) в числителе формулы (6). В остальном различий в формулах нет.

Белорусские нормы предлагают определять потери от релаксации напряжений в арматурной стали $\sigma_7 = \Delta\sigma_{pr}$ по табличным данным или по данным производителя.

ЕН 1992-1-1:2004 Еврокод 2 помимо методики, включенной в белорусские нормы, содержит методику, по которой потери от релаксации могут быть определены в процентном отношении как вариации предварительного напряжения относительно начального напряжения. Для 2-го класса арматуры по релаксации выражение имеет вид:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66\rho_{1000}e^{9,1\mu}(\frac{t}{1000})^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}, \quad (7)$$

где ρ_{1000} - значение релаксационных потерь, %, за 1000 ч после момента натяжения при средней температуре 20°C, полученное из

паспорта на сталь. Для высокопрочной стабилизированной проволоки значение релаксационных потерь, согласно ГОСТ 7348-81*, $\rho_{1000} = 2,5\%$ [13]. Аналогичную величину для 2-го класса арматуры предлагает и Еврокод 2.

Стоит особо отметить тот факт, что европейские и белорусские нормы при расчете потерь учитывают характеристики бетонного сечения, а не приведенного, как отечественные. Определение потерь по этим нормативным документам, как и по российскому СП 52-102-2004, базируется на предпосылке равенства относительных деформаций напрягаемой арматуры, установленной в сечении, и относительных деформаций укорочения бетона к некоторому произвольному моменту времени $t > t_0$.

Методика испытаний

В качестве экспериментальной модели были приняты центрально сжатые бетонные призмы размером $160 \times 80 \times 800$ мм без конструктивного армирования. Центральное сжатие в них создавалось за счет натяжения пары прутков высокопрочной проволоки 5Вр1400 по ГОСТ 7348-81* (S1400 по зарубежной классификации), пропущенных через каналы, образованные закладкой в опалубку до бетонирования пластикового кембрика. Для уменьшения трения проволоки о стенки канала пространство между прутками и каналообразователем заполнялось густой смазкой. Схема испытательной установки приведена на рис. 1.

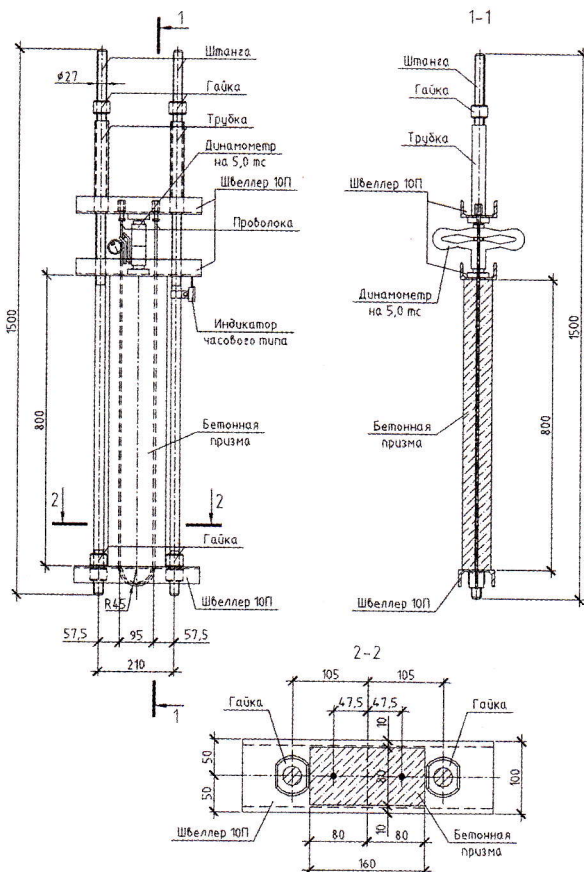


Рис. 1. Схема установки для определения полных потерь предварительного напряжения ($\sigma_2 + \sigma_3$)

Для определения потерь от релаксации напряжений в арматуре использовались отдельные установки (рис. 2). Натяжение высокопрочной проволоки в ней производится не на бетон призмы, а на неподвижную стальную раму. Потери предварительного напряжения, регистрируемые с помощью динамометра, в данном случае обусловлены только явлением релаксации напряжений в напрягаемой арматуре.

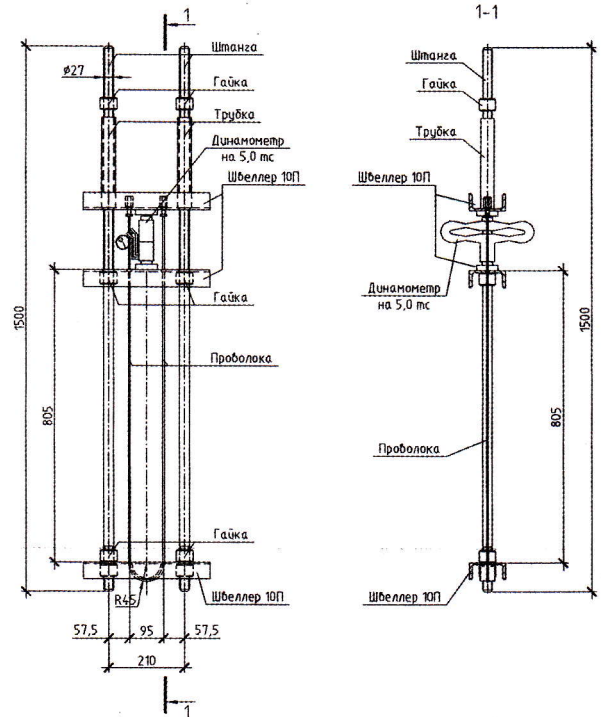


Рис. 2. Схема установки для определения потерь предварительного напряжения от релаксации

Для изучения потерь предварительного напряжения арматуры были собраны 10 установок – шесть для изучения общих потерь и четыре – для потерь от релаксации (рис. 3). Контроль усилия при натяжении и регистрация его изменения во времени осуществлялись с помощью динамометров.

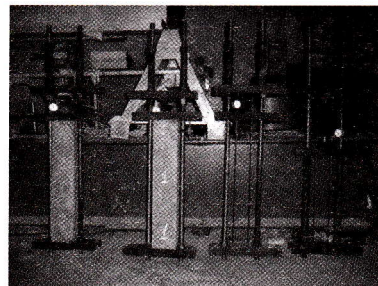


Рис. 3. Экспериментальные установки для определения потерь предварительного напряжения

Основой каждой установки является стальная рама, состоящая из двух стальных штанг $\varnothing 27$ мм с резьбой и трех опорных плит из швеллера 10П.

Во всех установках оба прутка проволоки представляют собой единый стержень, согнутый под углом 180° и диаметром загиба 89 мм. Для обеспечения плавного перегиба к нижнему швеллеру приварены сегменты трубы 89×5 мм (рис. 4). То, что прутки единый, позволяет сократить число сварных соединений

до двух – только для крепления болтов, с помощью которых осуществляется натяжение. Кроме этого, такая конструкция позволяет усилиям в ветвях перераспределяться (в некоторых пределах), сокращая вероятность обрыва при неравномерном натяжении ветвей.



Рис. 4. Организация места перегиба проволоки

Экспериментальная прочность бетона испытываемых образцов на осевое сжатие составляла около 29 МПа, что соответствует классу В22,5 ($E_b = 28500$ МПа; $\varphi_{b,cr} = 2,65$) [12]. Поскольку напряжение бетона производилось в возрасте 35 сут, передаточную прочность R_{bp} принимали по фактическому классу бетона. Натяжение проволоки осуществлялось за счет приваренных встык болтов М10×0,75 (с обычным шагом резьбы) класса прочности 12.9. Контроль усилия при натяжении и регистрация его изменения во времени осуществлялись с помощью динамометра.

При назначении усилия предварительного обжатия, геометрических размеров образцов и сроков проведения испытаний использовались рекомендации нормативов [14, 15]. Предварительное напряжение арматуры, принятое в эксперименте, было ограничено 980 МПа с целью недопущения разрушения сварного стыка проволоки и натяжных болтов.

Для изучения потерь предварительного напряжения за счет длительной релаксации напряжений в арматуре (σ_7) и вследствие ползучести бетона (σ_9) в экспериментальной модели были исключены (или минимизированы) факторы, вызывающие прочие потери: применение контролируемого напряжения позволило не учитывать обжатие шайб под натяжными гайками; трение натягаемой арматуры о стенки каналообразователей практически отсутствовало; значения потерь от усадки бетона было минимальным, принимая во внимание возраст призм на момент начала эксперимента (35 сут); натяжение обоих стержней производилось одновременно.

Для данной экспериментальной модели общие потери предварительного напряжения складываются лишь из двух их видов: σ_7 и σ_9 .

Эксперимент можно разделить на две части: определение суммарных потерь предварительного напряжения (σ) за счет релаксации напряжений в арматуре (σ_7) и вследствие ползучести бетона (σ_9) и определение потерь только из-за релаксации напряжений в арматуре. Тогда, определив σ в первом опыте и σ_7 во втором, потери σ_9 могут быть легко вычислены как их разность.

Результаты испытаний и расчетов

На рис. 5 показано нарастание потерь предварительного напряжения во времени.

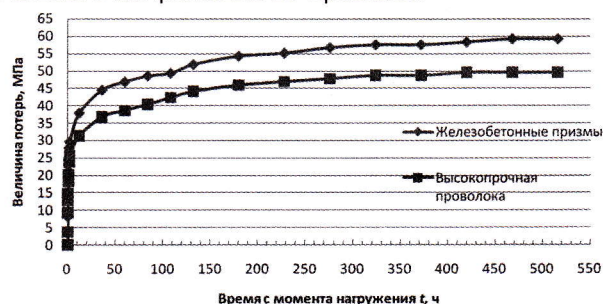


Рис. 5. Развитие потерь предварительного напряжения в изучаемых образцах во времени

Продолжительность (длительность) испытания образцов была определена из следующих соображений. Потери от релаксации, отображенные на рис. 5, были зафиксированы в течение первых 25 сут эксперимента. Величина прироста потерь, измеренная по истечении этого срока (даже через 1,5 года и более), была сопоставима с погрешностью измерений. Такая "короткая" релаксация объясняется относительно невысоким начальным натяжением проволоки либо предварительной заводской "стабилизацией" стали.

Потери от ползучести измеряли в те же сроки, в возрасте бетона от 35 до 60 сут. Возраст загрузки большинства сборных конструкций, доставляемых на строительную площадку, как правило, соответствует принятому в эксперименте. Это тем более справедливо для монолитных плит и балок, которые строители спешат ввести в работу как можно скорее, чтобы освободить опалубку. Другими словами, определение потерь от ползучести в изгибаемом элементе в возрасте, при котором в зоне предварительного обжатия уже присутствует растяжение от собственного веса (это обычно, как минимум, 30–40% от полной нагрузки), едва ли можно назвать целесообразным.

Величины потерь предварительного напряжения, вычисленные на основе упомянутых выше методик, а также определенные экспериментально, сведены в таблицу.

Сопоставительный анализ результатов испытаний и расчетов

Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с расчетными значениями, определенными на основе зависимостей названных ранее шести нормативных документов. Исходными данными для расчета являлись параметры образцов и испытательных установок: принятые в опыте нагрузки, геометрия и характеристики материалов.

Потери от релаксации напряжений в арматуре

Как можно увидеть из таблицы, потери, полученные по СП 52-102-2004 и по пособию к СНиП 2.03.01-84*, гораздо выше как полученных экспериментально величин (в среднем в 1,7 раза), так и полученных по расчетным зависимостям других нормативных докумен-

Расчетные и экспериментальные значения потерь предварительного напряжения

Вид потерь	Теоретическое значение потерь по нормативным документам, МПа							Экспериментальные данные
	ГОСТ 7348-81*	СП 52-102-2004	Пособие к СНиП 2.03.01-84*	СП 35.13330.2011	СНБ 5.03.01-02	ТКП 45-5.03-135-2009	ЕН 1992-1-1:2004	
σ_7	$\frac{42,54}{42,54}$	$\frac{80,22}{64,88}$	$\frac{82,22}{84,88}$	$\frac{40,12}{42,45}$	$\frac{31,40}{34,24}$	$\frac{31,40}{34,25}$	$\frac{6,18(35,77)}{6,97(38,22)}$	$\frac{47,65}{47,10}$
σ_9	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{36,73}$	$\frac{-}{17,68}$	$\frac{-}{6,57(17,46)}$	$\frac{-}{33,31}$	$\frac{-}{26,77}$	$\frac{-}{9,24(25,83)}$	$\frac{-}{8,85}$
$\sigma_7 + \sigma_9$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{121,61}$	$\frac{-}{102,56}$	$\frac{-}{49,02(60,16)}$	$\frac{-}{67,55}$	$\frac{-}{61,01}$	$\frac{-}{16,21(64,04)}$	$\frac{-}{58,35}$

Примечания: над чертой указана величина потерь для образцов призм, под чертой - для образцов проволоки; значения, указанные без скобок, соответствуют моменту завершения испытаний, цифры в скобках соответствуют окончательным величинам потерь

тов. Это можно объяснить тем, что приведенные в вышеназванных нормативах формулы справедливы скорее для нестабилизированной проволоки и канатов.

СП 35.13330.2011 ввиду приведенных рекомендаций снижать для стабилизированной арматуры потери, полученные по формуле (1), дает гораздо более близкий результат: отклонение итоговых значений потерь от экспериментальных данных составило для образцов проволоки от 14,6 до 17,2%.

Несмотря на более низкую начальную нагрузку (0,648-0,669 от разрывного усилия для испытуемых образцов), фактический уровень потерь от релаксации оказался выше предельных потерь, предписанных ГОСТ 7348-81*, определенных при уровне начальной нагрузки 0,7 от разрывного усилия. Отклонения составили 6,6-14,1%. Полученный результат может быть обусловлен более высоким фактическим разрывным усилием проволоки (этот параметр определен перед испытаниями не был) или произошедшими в зоне нагрева при сварке структурными изменениями в стали.

Также следует отметить, что потери, полученные расчетным путем для образцов проволоки по ГОСТ 7348-81* и СП 35.13330.2011, очень близки между собой: 42,54 и 42,29 МПа соответственно (различие 0,6%). Следовательно, вышеназванные рекомендации СП в отношении снижения потерь от релаксации были включены в актуализированное издание "Мосты и трубы" оправданно и достаточно точно отражают требования стандарта.

Величины окончательных потерь предварительного напряжения от релаксации напряжений в напрягаемой арматуре, полученные по всем зарубежным стандартам, оказались ниже как экспериментальных величин, так и полученных по отечественным нормам.

Потери от релаксации по СНБ и ТКП в образцах проволоки меньше экспериментальных величин на 31,1-37,3%.

Методика Еврокода 2, учитывающая возраст конструкции с момента нагружения, показала следующие результаты. Окончательные (через 57 лет с момента нагружения) значения потерь оказались меньше соответствующих экспериментальных на 23,2-26,8%. Значения же, полученные для образцов на момент завершения испытаний, меньше таковых по фактическим испытаниям в среднем в 8 раз. Расхождения однозначно превышают погрешности измерений и позволяют сделать вывод, что применительно к данной задаче методика Еврокода 2 неже-

лательна к применению. Не исключено, что формула (7) актуальна при возрасте конструкции $t > 1000$ ч, но этот вопрос требует дальнейшего изучения при более высоких начальных напряжениях.

Что касается динамики роста потерь предварительного напряжения, то она близка с данными, которые приводятся в белорусских и европейских нормах.

Потери от ползучести бетона

Экспериментальные потери, отнесенные к ползучести, вычисленные как разность полных потерь и потерь от релаксации, составили 8-9,7 МПа.

Величины окончательных потерь от ползучести, вычисленные по всем рассмотренным методикам, превосходят данные, полученные к окончанию эксперимента.

Как и в случае с потерями от релаксации, потери от ползучести, полученные по СП 52-102-2004, оказались самыми высокими по сравнению с другими нормативами. Экспериментальные потери, зафиксированные в бетонных призмах, оказались ниже в 3,7-4,7 раза.

Значения потерь от ползучести бетона, полученные в соответствии с пособием к СНиП 2.03.01-84 и СП 35.13330.2011, также превышают экспериментальные величины: для призм это превышение составляет 1,8-2,3 раза. Тем не менее, несмотря на затухающий характер графиков потерь, в случае если обжатие не будет погашено внешней нагрузкой, бетон будет продолжать "ползти", и с течением времени потери могут достичь подобных величин. Теоретические потери, вычисленные по зарубежным СНБ, ТКП и Еврокоду 2, оказались выше экспериментальных в 3,76; 3,87 и 2,92 раза соответственно.

Из рассмотренных документов лишь два позволяют учитывать развитие ползучести во времени.

Согласно СП 35.13330.2011, на момент окончания испытаний потери от ползучести в образцах должны быть ниже на 16,8-33,2% по отношению к экспериментальным значениям. Не исключено, что для зрелых возрастов бетона формула дает более точные значения, но данный вопрос требует более длительного экспериментального исследования.

Потери по Еврокоду 2 ко времени окончания испытаний более всех соответствует опытным результатам – данные опыта больше всего на 4%.

Суммарные потери $\sigma_7 + \sigma_9$, определенные по СП 52-102-200, дают запас для призмы 104,5-112,4%. Не исключено, что столь высокие "запасы"

обусловлены спецификой с точки зрения расчета испытываемых образцов, а именно отсутствием в них конструктивного армирования и относительно небольшой площадью напрягаемой арматуры (по отношению к площади бетонного сечения).

Величина общих потерь, определенная согласно СП 35.13330.2011, более всех соответствует опытным результатам: данные опыта больше всего на 1,2-4,8%. Отличается доля, занимаемая потерями каждого вида (экспериментально получены значительно более высокие значения потерь от релаксации), а опытные потери от ползучести, напротив, ниже расчетных.

Величины суммарных потерь, полученных по СНБ, ТКП и Еврокоду 2, также не очень превосходят данные эксперимента. Но, как и в случае с СП 35.13330.2011, это достигается значительно меньшей долей потерь от релаксации арматуры в общем уровне потерь.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что определение потерь в соответствии с СП 52-102-2004 применительно к данной задаче дает необоснованно высокий запас – более двух раз. Такая разница в уровне теоретических и практических потерь обусловлено, в первую очередь, тем фактом, что расчетная формула для определения потерь от релаксации справедлива для нестабилизированной арматуры, о чем говорит другой документ – СП 35.13330.2011. Также запас закладывается и на этапе определения потерь от ползучести бетона.

Кроме того, данный норматив не позволяет определять специфические для постнапряженных конструкций потери: например, вызванные трением арматуры о стенки каналов или проскальзыванием напрягаемой арматуры в анкерных устройствах.

Потери предварительного напряжения, определенные по материалам обязательного приложения Р вступившего в силу СП 35.13330.2011 "Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84", несмотря на простоту приведенных зависимостей, показали лучшее соответствие эксперименту. Величина потерь предварительного напряжения от релаксации напряжений в стабилизированной проволоке, определенная по данному документу при равных уровнях натяжения, соответствует величинам, полученным по ГОСТ 7348-81*. В данном нормативе приведены расчетные зависимости практически для всех видов потерь, возникающих в преднапряженных конструкциях. Отсутствующие потери от упругой деформации бетона при последовательном натяжении напрягаемой арматуры могут быть определены из геометрических соображений по общим правилам сопротивления материалов или по другим документам (СНБ, ТКП или Еврокод 2).

Таким образом, основной проблемой вычисления потерь предварительного напряжения по европейским и белорусским нормам стало заниженное

(на 30-40% по сравнению с экспериментальным) значение потерь от релаксации напряжений в арматуре. Возможно, данное несоответствие вызвано тем, что применяемая стабилизированная проволока не вполне соответствует 2-му классу по релаксации. Ввиду сложности и кропотливости расчетов, не подкрепленных высоким соответствием эксперименту, использование данных зарубежных норм применительно к таким несложным задачам не оправдано. Неоспоримое же преимущество всех этих документов заключается в том, что в них представлены расчетные зависимости для всех видов потерь, возникающих в любых преднапряженных конструкциях, – как с натяжением арматуры на упоры, так и на бетон.

Очевидно, что перспективным может стать комплексное применение методик СП 35.13330.2011 и Еврокод 2 для определения потерь от релаксации и ползучести соответственно.

Библиографический список

1. **Мадатян С.А.** Системы предварительного напряжения арматуры с натяжением ее на бетон без сцепления // Технологии бетонов. - 2007 - №1(12) - С. 48-51.
2. **Сидорок И.Н.** Как снизить расход арматуры и бетона // Строительная газета - 14.06.2009.
3. **FIB BulletinNo. 31.** Post-tensioning in buildings: Technical report. - Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib) - 2005.
4. **Stuart M.** Antiquated Structural Systems Series. Part 7 // Structure Magazine. - December 2008. - Pp. 25-27.
5. **Портаев Д.В.** Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий: Научное издание - М.: АСВ, 201. - 248 с.
6. **Пособие** по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84*), Ч. I и II - Введ. 30.11.1984. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 166 с.
7. **СП 35.13330.2011.** Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84 - Введ. 20.05.2011. - М.: Минрегион России, 2011. - 345 с.
8. **ЕН 1992-1-1:2004.** Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1: Общие правила и правила для зданий.
9. **ЕН 1992-2:2005 Еврокод 2.** Проектирование железобетонных конструкций. Часть 2: Железобетонные мосты, Правила расчета и конструирования.
10. **СНБ 5.03.01-02.** Бетонные и железобетонные конструкции. - Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. - 149 с.
11. **ТКП 45-5.03-135-2009 (02250).** Железобетонные предварительно напряженные конструкции без сцепления с бетоном. - Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2010. - 19 с.
12. **СП 52-102-2004.** Предварительно напряженные железобетонные конструкции - Введ. 24.05.2004. - М.: ФГУП ЦПП, 2005.
13. **ГОСТ 7348-81*.** Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия. - Взамен ГОСТ 7348-63 и ГОСТ 8480-63 - Введ. 01.01.1983. - М.: Изд-во стандартов, 2003 - 26 с.
14. **ГОСТ 24544-81*.** Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести - Введ. 01.01.1982. - М.: Изд-во стандартов, 1985. - 26 с.
15. **ГОСТ 28334-89 (СТ СЭВ 6433-88).** Проволока и канаты стальные для армирования предварительно-напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации - Введ. 01.07.1990. - М.: Изд-во стандартов, 1990. - 4 с.