

УДК 624.012

Анализ результатов расчета предварительно напряженных конструкций по белорусским и Европейским нормам

Янчук А.А.

(Научный руководитель – Пецольт Д.М.)

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

За последнее десятилетие в области нормативной документации в строительстве в нашей стране произошел целый ряд изменений. В России конструктора до сего времени пользуются документами тридцатилетней давности СНиП 2.03.01–84 «Бетонные и железобетонные конструкции», в то время как в нашей Республике действуют СНБ 5.03.01–02 «Бетонные и железобетонные конструкции» и ТКП EN 1992-1-1–2009 «Проектирование железобетонных конструкций». Решение же о применении при проектировании тех или других ТНПА принимается заказчиком и проектной организацией с указанием этого условия в контракте (договоре) на проектные работы и задания на проектирование. Следовательно, одни и те же конструкции могут быть рассчитаны по-разному, опираясь на соответствующие ТНПА. Поэтому возникает вопрос о необходимости сравнительного анализа расчета конструкций для выявления расхождений в них, которые могут влиять на качество проектов.

В предварительно напряженных железобетонных конструкциях одними из определяющих факторов расчета является назначение напряжений в арматуре на всех технологических этапах создания вплоть до эксплуатации конструкции.

Согласно п.1.23. СНиП 2.03.01–84 и п. 9.2.1 СНБ 5.03.01–02 напряжения в конструкциях ограничиваются, причем верхний предел назначается из требований, чтобы при натяжении относительные деформации арматуры не выходили в область больших неупругих деформаций и не произошел бы ее разрыв. Нижний же предел обеспечивает минимальный уровень предварительного напряжения с учетом проявления потерь. Максимальные усилия напряжения назначаются с учетом допустимых отклонений значения предварительного напряжения, которые могут возникнуть по технологическим причинам в процессе натяжения. Методика по определению

данных отклонений в документах совпадает, но допустимые отклонения напряжений не нашли отражения в ТКП EN 1992-1-1-2009.

Максимальные напряжения в напрягаемой проволочной арматуре и канатах, по Еврокоду и СНБ назначаются в долях от f_{pk} и от $f_{p0,1k}$. Причем коэффициенты аналогичны и составляют 0,8 и 0,9 соответственно. Ограничения для проволочной арматуры и канатов в СНиП отдельно не приведены.

Максимальные усилия непосредственно после передачи предварительного натяжения в СНиП 2.03.01-84* не отражены. Усилия же предварительного обжатия в СНБ и ТКП частично совпадают, как доля, а точнее 0,75, от f_{pk} . В Еврокоде помимо вышеописанного ограничения усилия предварительного напряжения составляют долю от $f_{p0,1k}$. Также следует отметить, что согласно СНБ $f_{p0,1k}$ допускается определять как 0,9 f_{pk} и тогда данное ограничение для СНБ не имеет смысла, в то время как по Еврокоду $f_{p0,1k}$ определяется согласно СТБ EN 10138-3-009, где данное значение определяется путем деления критической силы на соответствующую площадь арматуры, и тогда значение $f_{p0,1k}$ составляет порой и 70% от значения f_{pk} . Тогда данное ограничение является весьма оправданным.

Ограничения максимальных усилий обжатия, с учетом всех потерь, приведены только в СНБ 5.03.01-02. В других ТНПА данное значение не оговаривается.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что наиболее жесткие условия по ограничениям напряжений приведены в СНБ «Бетонные и железобетонные конструкции», т.к. данное значение проверяется на каждом технологическом этапе создания предварительного напряжения в арматуре.

Вторым немаловажным фактором при расчете предварительно напряженных конструкций является учет потерь напряжений. Все нормативные документы эти потери делят на первые потери (технологические) и вторые потери (эксплуатационные), однако виды потерь и методика их определение частично не совпадают.

Рассмотрим вначале потери от релаксации напряжений в арматуре. Анализируя методику определения этих потерь, приведенных в ТНПА, видно, что в СНиП 2.03.01-84* и в СНБ 5.03.01-02 имеют аналогичные зависимости. Однако СНБ предусматривает и альтер-

нативный вариант определения данных потерь по таблицам и более детально представляет расчет по приложению Г4. Эта методика приведена и в ТКП EN как основная. Для еще более детального определения данных потерь приведено приложение D. Таким образом в Евронормах предоставляют наиболее детально проработанный расчет этих потерь.

Потери, вызванные разностью температур арматуры в зоне нагрева и устройства, воспринимающего усилие натяжения при прогреве бетона аналогичны в СНиП и СНБ, величины этих потерь напряжений определяют по эмпирическим формулам, но Еврокод помимо эмпирической формулы непосредственных потерь, реализует температурное влияние на значение потерь через эквивалентное время, которое необходимо прибавить ко времени релаксации, т.е. температурный перепад влияет на релаксацию напряжений в арматуре.

Потери от деформации анкеров по СНиП и по СНБ аналогичны для конструкций с натяжением на упоры. Значения потерь для конструкций с натяжением на бетон уточняются в СНиП «Бетонные и железобетонные конструкции». В Евронормах оговорена необходимость учета данных потерь, но сама методика их определения не представлена, ссылаясь на соответствующие ТНПА.

Методика определения потерь от трения арматуры во всех нормах аналогична, различаются лишь степени при экспоненте, однако при расчете по приведенным коэффициентам они уравниваются.

Потери, вызванные упругой деформацией бетона, детально описаны в СНБ, как для конструкций с натяжением на упоры, так и для конструкций с натяжением на бетон. Данные потери при натяжении на бетон отражены и в Еврокоде. Однако методика их определения различна.

Существуют такие виды потерь напряжений, которые представлены лишь в одном из трех нормативных документах. К ним относятся потери, вызванные проскальзыванием напрягаемой арматуры в анкерных устройствах, отраженные лишь в СНБ. Потери от быстронатекающей ползучести бетона, представленные в СНиП.

Вторые потери для конструкций с натяжением на упоры по СНБ и ТКП EN аналогичны, сюда относятся потери предварительного напряжения, вызванные ползучестью, усадкой и релаксацией

напряжений. Единственным различием в формулах является коэффициент 0,8 при абсолютном значении изменения напряжения в напрягающих элементах в сечении x в момент времени t вследствие релаксации напрягаемой стали. Релаксация стали зависит от деформации бетона вследствие ползучести и усадки. Данное взаимодействие, в общем случае, приблизительно может быть учтено этим понижающим коэффициентом. Однако данный коэффициент редко влияет на расчет, т.к. реологические потери в большем объеме уже учтены в первых потерях. В СНиП все вышеперечисленные потери определяются отдельно с последующим суммированием.

Потери предварительного напряжения в конструкциях с натяжением на бетон такие как: потери от смятия бетона под витками спиральной или кольцевой арматуры и потери от деформация обжатия стыков между блоками в СНиП и СНБ представлены одинаково и вовсе не отражены в ТКП EN.

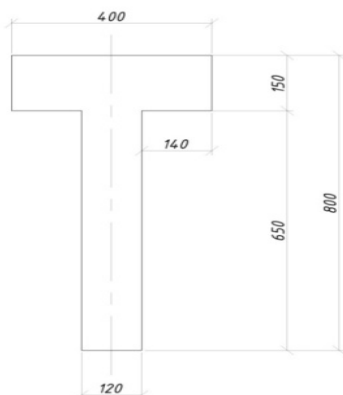


Рисунок 1. Балка сборная заводского изготовления

Выводы о влиянии тех или иных потерь по видам и по формулам без практического расчета сделать сложно. В связи с этим далее представлены результаты расчета железобетонной предварительно напряженной балки таврового сечения.

Балка сборная заводского изготовления. Бетон тяжелый класса прочности на сжатие по СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции» и по ТКП EN 1992-1-1-2009 «Проектирование железобетонных конструкций» С30/37 и В35 по СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции».

Бетон подвергнут тепловой обработке при атмосферном давлении. Марка бетонной смеси по удобоукладываемости П2. Способ натяжения арматуры механический на упоры стенда.

В качестве напрягаемой арматуры приняты арматурные семипроволочные канаты Ø15 класса S1400. Для ненапрягаемой арматуры сварных каркасов и сеток принята стержневая арматура класса S400.

На основании расчетов была составлена таблица усилий предварительного напряжения в арматуре, рассчитанных на основных стадиях изготовления и эксплуатации конструкции.

Таблица 2.

СНиП 2.03.01-84*	СНБ 5.03.01-02	ТКП EN 1992-1-1-2009
Максимальные усилия предварительного напряжения		
$P_0 = 632.04 \text{ кН}$	$P_0 = 594.72 \text{ кН}$	$P_0 = 634.37 \text{ кН}$
Усилия предварительного напряжения непосредственно после передачи усилия предварительного натяжения		
$P_1 = 491.35 \text{ кН}$	$P_{0,c} = 490.07 \text{ кН}$	—
Усилие предварительного обжатия к моменту времени $t = t_0$, действующее непосредственно после обжатия		
$P_1 = 471,6 \text{ кН}$	$P_{m0} = 445.59 \text{ кН}$	$P_{m0} = 566.27 \text{ кН}$
Усилия обжатия (с учетом всех потерь)		
$P_2 = 394.74 \text{ кН}$	$P_{m,t} = 428.86 \text{ кН}$	$P_{m,t} = 544.66 \text{ кН}$
Суммарные потери напряжений		
$\Delta P = 237.3 \text{ кН}$	$\Delta P = 165.86 \text{ кН}$	$\Delta P = 89.71 \text{ кН}$

Как видно из таблицы, максимальные усилия предварительного напряжения, прикладываемые к арматуре, возможны по Еврокоду, которые практически аналогичны начальным усилиям по СНиП 2.03.01-84* (разница меньше 1%). Расхождение же значений с ныне действующими нормами составляет $\approx 6...7\%$. Также необходимо отметить, что нормативное сопротивление стали везде принималось одинаковым, а данная разница частично объясняется разницей коэффициентов безопасности для арматуры, т.к. по СНиП $\gamma_c=1,2$; по СНБ $\gamma_c=1,25$, а по ТКП EN $\gamma_c=1,15$. Отсутствие же в Еврокоде величины отклонения предельных напряжений значительно повысило теоретическую планку возможных напряжений.

Усилия предварительного напряжения непосредственно после обжатия по советским и белорусским нормам также очень близки (разница меньше 1%). Наибольшие различия наблюдаются при сравнении усилий предварительного обжатия к моменту времени $t = t_0$, действующих непосредственно после обжатия на конструкцию. В то время как данные величины по СНиП 2.03.01-84* и по СНБ 5.03.01-02 равны 471,6 кН и 445,6 кН соответственно, значение усилия предварительного напряжения по ТКП EN 1992-1-1-2009 составляет 566,27 кН, т.е. больше вышеприведенных примерно на 26%.

Сравнивая усилия обжатия (с учетом всех потерь) по ТНПА видно, что они значительно отличаются по всем документам. Так, по сравнению с СНБ 5.03.01-02 усилия, полученные из расчетов по СНиП 2.03.01-84* меньше на 8%, а значения рассчитанные по ТКП EN 1992-1-1-2009 больше на 27%.

Чтобы объяснить полученные результаты необходимо определить уровень суммарных потерь напряжений. Так, сравнивая СНиП и Еврокод, различия в усилиях составляют более 150%. Рассматривая же потери напряжений в долях от первоначальных, можно сделать вывод, что по СНиП они составляют практически 40%, по СНБ примерно 30%, а по ТКП EN всего 15%. Значит, различия в расчетах необходимо искать в потерях предварительного напряжения. Для этого составлена сравнительная таблица по потерям напряжений в арматуре в железобетонной балке таврового сечения.

Анализ показал, что методики определения потерь от деформации анкеров во всех нормативных документах одинаковы, что подтверждают и числовые результаты. Разница величин обусловлена различными значениями модуля упругости напрягаемой арматуры, принятым в каждом документе.

Потери от температурного перепада по СНиП и по СНБ оказались одинаковыми ввиду аналогичности расчета. Значения же по Еврокоду отличаются более чем в два раза, однако необходимо отметить, что величина температурного перепада согласно методике определения потерь напряжений учитывается дважды – как непосредственно через температурные потери, так и через эквивалентное время, прибавляемое ко времени, прошедшему после предварительного натяжения, в функциях времени релаксации.

Таблица 1.

Потери предварительного напряжения, МПа			
Технологические потери			
Факторы, вызывающие потери предварительного напряжения арматуры	СНиП 2.03.01-84*	СНБ 5.03.01-02	ТКП EN 1992-1-1-2009
1. Релаксация напряжений арматуры:	119,5	68,25	41,37
2. Температурный перепад	50	50	22,01
3. Деформации анкеров	63	66,5	68,27
4. Трение арматуры	0	0	0
Факторы, вызывающие потери предварительного напряжения арматуры	СНиП 2.03.01-84*	СНБ 5.03.01-02	ТКП EN 1992-1-1-2009
5. Деформация стальной формы	0	0	0
6. Быстронатекающая ползучесть для бетона:	34,87	-	-
7. Потери, вызванные упругой деформацией бетона	-	78,53	-
Суммарные первые потери	267,37	263,28	131,65
Эксплуатационные потери			
8. Усадка бетона:	8,9. Реологические потери:	35	29,53
9. Ползучесть бетона:		100,7	
Суммарные вторые потери	135,7	29,53	21,61
Суммарные общие потери	403,07	292,81	153,26

Некоторые потери отражены лишь в одном документе. Значение же потерь от таких факторов как быстронатекающая ползучесть для бетона по СНиП и потери, вызванные упругой деформацией бетона по СНБ занимают немалую долю в общем объеме технологических потерь (примерно 15% и 30% соответственно).

Наибольшее различие в первых потерях напряжения наблюдается за счет потерь от релаксации напряжений в арматуре. И если данное отличие в величинах по СНиП и по СНБ можно объяснить различным уровнем начального напряжения в арматуре и принятых в расчетных формулах расчетных и нормативных значений сопротивления арматуры (по СНиП и по СНБ соответственно), то отличия от Еврокода объясняются другой методикой определения дан-

ных величин, ссылающейся на классы арматуры и значений паспортных или примерных релаксационных потерь для данной арматуры.

Изучая эксплуатационные потери, отметим, что в СНиП потери от усадки бетона и его ползучести разделены, в то время как в более современных документах они объединены в реологические потери. Просуммировав данные значения легко увидеть, что по старым нормам значения вторых потерь превышают потери по ныне действующим документам практически в пять раз. Так эксплуатационные потери составляют практически 35% от общих по СНиП и всего 10% по СНБ и 15% по ТКП EN. Различия в 25% между значениями по СНБ и Еврокоду объясняются разным подходом к определению деформаций усадки бетоном. Различий же в определении коэффициента ползучести по номограммам не было, ввиду выбранного для расчета по Еврокоду класса цемента N по EN 12390.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в одинаковых конструкциях при разных значениях предварительных напряжений, количество продольной арматуры может быть различной. Так, даже весьма существенные различия, в конечных значениях предварительного напряжения никак не отразятся на продольном армировании конструкции по первой группе предельных состояний (изменения в показателе $\sigma_{s,lim}$ и как следствие ξ_{lim} незначительны). В то время как при расчетах по подбору поперечной арматуры и при расчетах по трещиностойкости и по деформациям, результаты расчетов в значительной степени зависят от данных значений. Так в конструкциях с большим предварительным напряжением наблюдается более высокий уровень трещиностойкости (за счет момента M_{cr}) и меньший уровень деформативности (за счет момента M_{cr} и выгиба от предварительного обжатия). Тем самым позволяя сократить количество арматуры, а, следовательно, и материальные ресурсы.

Полученные теоретические материалы говорят о том, что хотя методики оценки потерь предварительного напряжения в арматуре при ее натяжении на упоры достаточно близки, но выявление расхождения требует более глубокой экспериментальной проверки, в том числе и в заводских условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 5.03.01–02 Бетонные и железобетонные конструкции. – 2003.– 139 с.
2. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. – 1996.– 76 с.
3. ТКП EN 1992-1-1-2009 Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий – 207 с.