

ОШИБКИ В СТАНДАРТАХ ПО РАСЧЁТУ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Р.С. САНЖАРОВСКИЙ, *д-р техн. наук, профессор*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный

университет, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4

Проведен анализ теоретических моделей, гипотез и экспериментальной основы норм по расчёту сжатых железобетонных несущих конструкций. Выявлены существенные ошибки в результатах расчётов и их неэкономичность. Показаны дефекты технических регламентов ряда стран. Рассмотрение осуществлено с позиций правил Еврокодов и моделей строительной механики. Указаны пути устранения ошибок при проведении переработки, или выполнении «гармонизации» норм с Еврокодами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Еврокоды, метод предельного равновесия, теоретическая основа норм.

Современные нормы России и некоторых других стран, посвященные сжатым железобетонным конструкциям, представляет собой набор ошибочных теоретических принципов и моделей, подправленный эмпирическими коэффициентами, разрушившими смысл теории расчета сооружений и экономичность результатов расчетов.

В последнее время к этому набору ошибочно приставлены строгие гипотезы деформационной модели сечения Еврокодов, которые, по своей сути, напрочь отвергают этот нормативный метод. Образованная формальным сложением, современная смесь (нормативный метод плюс модели Еврокодов) лишь подчеркивает необходимость срочной переработки ошибочного нормативного набора, высвечивает все его дефекты. Публикации последних лет по данной проблеме демонстрируют, что существо проблемы воспринимается неверно.

Проведем краткий анализ существующих ошибок и укажем пути их устранения, руководствуясь правилами Еврокодов.

Первая ошибка – навязывание сжатым конструкциям чуждого для них пластического шарнира. Основой теоретической модели норм, является ошибочный принцип эквивалентности предельных состояний колонн и балок. В этом принципе для колонн измышляется три ошибочных постулата:

- о существовании у сжато-изогнутых колонн пластического шарнира;
- об одновременном присутствии по длине колонны трех областей – упругой, упругопластической, пластической;
- наиболее нагруженное сечение колонны ведет себя вполне упруго вплоть до образования пластического шарнира.

В соответствии с этими постулатами, в нормы вводятся ошибочные теоретические модели, которые приспособляются к особенностям статической работы колонн. Понятие пластического шарнира в данной статье не обсуждается, так как оно подробно описано в известных работах М.И.Ерхова, Л.М.Качанова, А.Р.Ржаницына, А.Надаи, А.А.Гвоздева.

Следует обратить внимание, что перечисленные постулаты, характерные для изгибаемых конструкций, не имеют никакого отношения к сжатым конструкциям. У балок момент появления пластического шарнира является началом нарушения равновесия, началом разрушения; до этого момента балка находилась в равновесии с совокупностью упругопластической и упругой областей.

У сжатоизогнутых колонн, а также у колонн, искривленных до начала сжатия, пластический шарнир вообще не возможен; у внецентренно сжатых колонн пластический шарнир может появиться в нереальной ситуации - когда колонна не имеет длины ($L=0$) - в этой ситуации отсутствует упругая и упругопластическая области. Нарушение равновесия, предельные состояния достигаются у сжатоизогнутых колонн только в упругопластической стадии.

В методе предельного равновесия балок с целью упрощения пренебрегают упругопластической стадией работы. Для этих целей и вводится третий постулат, связанный с началом образования пластического шарнира, с достижением предельного равновесия. Пренебрежение упругопластической стадией работы, позволяет приближенно с помощью упругой модели оценить величину упругопластического прогиба балки, превышающего упругий прогиб приблизительно в два раза.

В сжатоизогнутых конструкциях, ввиду отсутствия пластического шарнира, третий постулат лишен всякого смысла. Несмотря на это обстоятельство, в сжатых железобетонных конструкциях этот постулат является основой нормативной теории: «в интересах простоты расчета еще более желательно, чем при изгибе..., допускать..., что сечение ведет себя упруго вплоть до образования пластического

шарнира». Таким приемом упругопластическая стадия работы колонн устраняется из нормативных моделей, колоннам навязывается чуждая модель пластического шарнира. Однако, только на основании упругопластических моделей Еврокодов и теории расчета сооружений оказывается возможным выявить всю диаграмму предельных состояний сжатых железобетонных конструкций, рис. 1.

Все предельные величины несущей способности сжатых железобетонных конструкций находятся внутри упругопластической диаграммы ($ON_T N_T^3 L$). Вне этой диаграммы, предельное равновесие сжатых конструкций невозможно. Диаграмма ограничена четырьмя линиями: (ON_T), ($N_T N_T^3$), ($N_T^3 L$), (OL). На оси ординат отрезок (ON_T) является левой границей диаграммы, характеризующей значения продольных сил N колонн. По замыслу разработчиков норм, этот отрезок и предназначен для описания всей диаграммы ($ON_T N_T^3 L$), что, к сожалению, невозможно. Нижняя точка O отрезка (ON_T) соответствует модели пластического шарнира балок. В этой точке продольная сила N колонны равна нулю, а ее эксцентриситет $e_u = M_u / N$ равен бесконечности ($M_u = \max$). Только в точке O и только для балок оказывается возможным применить указанные выше три постулата.

Верхняя точка N_T отрезка (ON_T) соответствует полной пластичности сечения при центральной сжатии. Длина всех колонн на отрезке (ON_T) равна нулю ($L=0$). Эта же одна точка N_T в нормах, на линии ON_T , соответствует всему бесконечному многообразию сжатых колонн с поперечной нагрузкой, также колонн с начальным прогибом. Интервал (ON_T) соответствует модели пластического шарнира, присущего внецентренному сжатым колоннам не имеющим длины ($L=0$). В остальных местах диаграммы ($ON_T N_T^3 L$) пластического шарнира нет. В точке N_T эксцентриситет продольной силы, а также предельный момент сечения – равны нулю ($M_u = 0$; $e_u = 0$). Горизонтальный участок ($N_T N_T^3$) соответствует полной пластичности центральносжатой железобетонной колонны; длина такой колонны принимает любое значение от 0 до L_T . Правый криволинейный участок ($N_T^3 L$) диаграммы является гиперболой Эйлера, и определяет значения критической силы колонны в зависимости от длины ее, при упругой потере устойчивости центрально сжатой колонны ($e=0$; $N_{\text{Э}} = \pi^2 E_e J_e / L^2 + \pi^2 E_s J_s / L^2$). По оси абсцисс (OL) отложена длина колонны L ; эта же ось соответствует любым изогнутым балкам, в предельном состоянии обладающим пластическим шарниром.

Диаграмма ($ON_T N_T^3 L$) строго соответствует всему возможному набору сжатых железобетонных колонн, при заданных механических характеристиках бетона и стали, а также с заданной формой поперечного сечения. Внутри данной диаграммы существенно различается характер поведения кривых предельных состояний, в зависимости от схемы статического нагружения колонны: внецентренное сжатие, сжатие с поперечными силами, сжатие при начальных прогибах конструкции, сочетания перечисленных схем. Вне данной диаграммы реальных конструкций не существует.

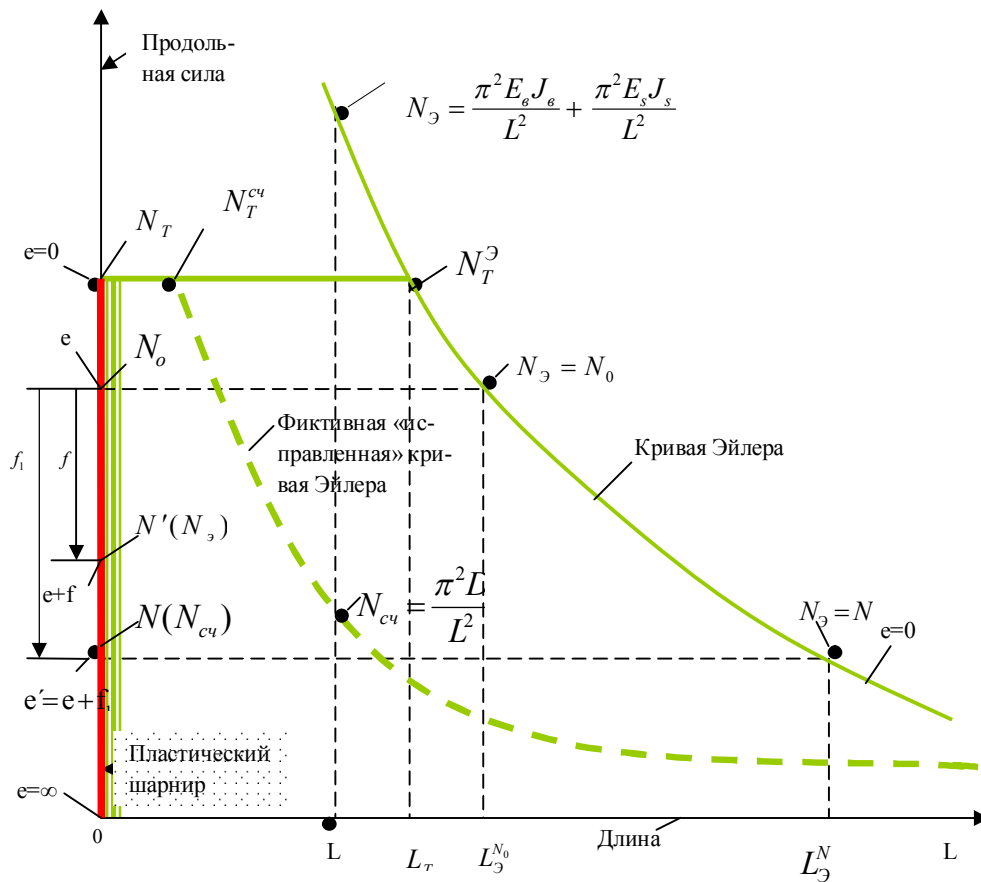


Рис. 1

Обратим внимание, что любые самовольные перемещения границ диаграммы $(ON_T N_T^Э L)$ свидетельствует об отрицании деформационной модели сечения Европейских норм по железобетону, отвергают суть Еврокодов. Однако, нормы России, других стран, изымают кривую Эйлера $(N_Э = \pi^2 E_г J_г / L^2 + \pi^2 E_с J_с / L^2)$ из ее реального положения $(N_T^Э L)$, рис.1, обусловленного моделью Еврокодов, и «исправляют» ее, сдвигая в середину диаграммы $(ON_T N_T^Э L)$, рис.1, отвергая таким действием продекларированные гипотезы и модели Еврокодов. Процедура такого «исправления» обсуждается несколько ниже.

Вторая ошибка – внедрение в модель пластического шарнира колонны прогиба. Пластический шарнир на линии (ON_T) связывает между собой только два параметра (N - сила, e - эксцентриситет), тогда как на диаграмме $(ON_T N_T^Э L)$ предельное состояние любой колонны определяется тремя ее параметрами (N – сила, e - эксцентриситет (либо начальный прогиб f_0 , либо поперечная нагрузка Q), L – длина). Практика показала, что диаграмму $(ON_T N_T^Э L)$ удобно представлять в графической, либо в табличной формах, построенных учеными заранее.

В пластическом шарнире ON_T каждому значению продольной силы N_0 соответствует определенное значение эксцентриситета $e = M_u(N_0)/N_0$, где значение предельного момента $M_u(N_0)$ строго определяется величиной силы N_0 . Если реальная колонна имеет набор трех величин (e, L, N) , характеризующих ее предельное равновесие, то пластический шарнир выделяет (рис. 1) для этой колонны набор двух различных расчётных точек (N_0, e) и (N, e') , не имеющих никакого отношения к заданной длине L . При этом сила N_0 , соответствующая эксцентриситету e , значительно превышает реальную силу N , которой пластический шарнир выделяет unnecessary значение эксцентриситета $e' = M_u(N)/N$.

Такова теоретическая особенность модели пластического шарнира для колонн: существенная неоднозначность значений силы и эксцентриситета; полная неопределенность длины.

Правая криволинейная граница $(N_T^2 L)$ диаграммы $(ON_T N_T^2 L)$ имеет связь с реальной длиной колонны L , и дает реальную теоретическую величину силы N , на кривой Эйлера. Однако, здесь эксцентриситет e равен нулю, а модель Эйлера соприкасается с моделью пластического шарнира в точке $(N_T = \infty, L = 0)$. Между этими моделями-границами, находится реальная упругопластическая модель работы колонны, имеющая с границами диаграммы органичную непрерывную связь. Но реальная упругопластическая модель в нормах отвергается, ввиду сомнительных и ошибочных приоритетов: приоритет установлен не научным методом или свойствами железобетона, а интересами составителей норм – «они зачастую обуславливаются не столько свойствами материалов, сколько личными взглядами и вкусами составителей норм».

Для целей «исправления» ошибок модели пластического шарнира, и уменьшения значений продольной силы N_0 на величину $\Delta N = N_0 - N$, в точное значение эксцентриситета $e = M_u(N_0)/N_0$ внедряется инородная для модели величина, названная прогибом f . У модели пластического шарнира колонны, ввиду особенности статической работы и условий равновесия, отсутствует какой либо прогиб. Однако, разработчиками преследуется цель приспособить третий постулат, отмеченный выше. Поэтому, в модель пластического шарнира, а именно в значение эксцентриситета e , соответствующего силе N_0 , вставляется величина f , называемая затем прогибом, формула для которого заимствуется из линейной модели, не имеющей отношения ни к методу предельного равновесия, ни к диаграмме $(ON_T N_T^2 L)$.

Увеличение эксцентриситета $e_1 = e + f$, приводит к соответствующему уменьшению продольной силы пластического шарнира $N' = M_u(N')/(e + f)$. Факт надуманности параметра f не обсуждается, а появление этого параметра ошибочно считается очевидным: «Благодаря эксцентриситету нагрузки элемент к моменту разрушения прогнется. В связи с этим эксцентриситет продольной силы возрастет».

Третья ошибка – извлечение ошибочной формулы для описания прогиба. Извлечение несуществующего прогиба f , дополняется использованием ошибочной формулы для его описания. Параметр f записывается в форме соответствует кривой 2 на рис.2, заимствованной из линейной модели деформирования колонны с на-

чальным прогибом f_0 , в которой величина f_0 заменена значением эксцентриситета e , соответствующего силе N_0 ,

$$f = \frac{e}{\frac{N_{\text{Э}}}{N'} - 1}, \quad (*)$$

где N' - величина искомой силы; $N_{\text{Э}}$ - критическая сила Эйлера, равная в данном случае $N_{\text{Э}} = \pi^2 E_e J_e / L^2 + \pi^2 E_s J_s / L^2$.

Недостатки формулы (*) определяются двумя обстоятельствами, вносящими свой вклад в совокупность ошибок. Первое обстоятельство состоит в наделении сжатоизогнутой упругой колонны понятием критической силы Эйлера, которой у нее не существует, рис. 2. Вторая ошибка состоит в стремлении прогиба f , кривая 2, к бесконечности, при значениях N приближающихся к отсутствующей силе Эйлера.

Следует отметить, что в теории сооружений, помимо ошибочной формулы (*), существует еще два теоретических решения, иллюстрированных кривыми 1, 3 на рис. 2. Кривая 1 соответствует упругопластической модели Еврокодов, имеет ниспадающий участок.

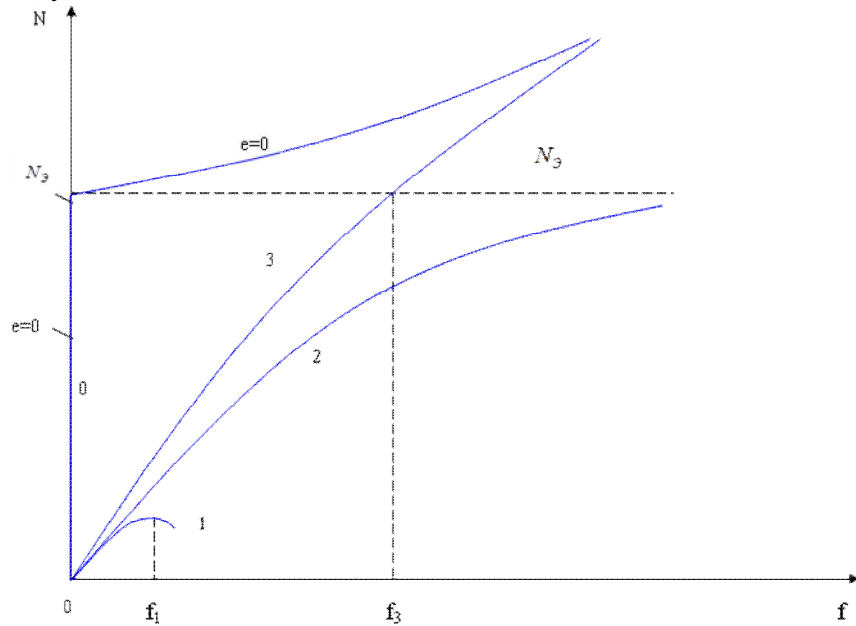


Рис. 2

Кривая 3 соответствует точному решению, для упругой модели, подчиняющейся закону Гука и точному выражению для кривизны изогнутой оси сжатоизогнутой колонны. Критическая сила $N_{\text{Э}}$ центрально сжатой колонны, не имеет никакого отношения к поведению кривой 3; кривая 3 пересекает горизонтальную линию $N_{\text{Э}}$ при конечном значении прогиба f_3 , показывая ошибочность поведения нормативной кривой 2. Кривая 2 соответствует упругой модели закона Гука, и приближенному выражению для кривизны, отвергаемому бесконечно большими значениями прогиба f .

Линия 0, состоящая из двух участков, соответствует центрально сжатой упругой модели колонны, у которой имеется реальная сила Эйлера N_0 , соответствующая реальным условиям статического нагружения колонны, реальным модулям упругости бетона и стали с реальных диаграмм σ - ϵ , реальным моментам инерций сечений бетона и стали. Впоследствии эти реальные параметры конструкции подменяются, чем разрушается правая граница диаграммы ($ON_T N_T^2 L$).

Из трех вариантов кривых N - f , представленных на рис. 2, выбрана ошибочная кривая 2 и вставлена в несуществующую, для сжатоизогнутых колонн, модель пластического шарнира. Искусственное внедрение упругого прогиба в значение эксцентриситета пластического шарнира, позволило уменьшить силу N_0 до значения N' , рис. 1. Однако, найденная величина новой силы N' , оказалась снова значительно большей, чем реальная сила колонны N (из реальной совокупности L , e , N).

С целью дальнейшего уменьшения значения силы N' до величины N совершается еще одно ошибочное действие.

Четвертая ошибка – фиктивное «наклонение» кривой прогибов 2.

Процедура «наклонения» кривой 2, соответствующей линейной модели (*), осуществляется приемом, изображенном на рис. 3.

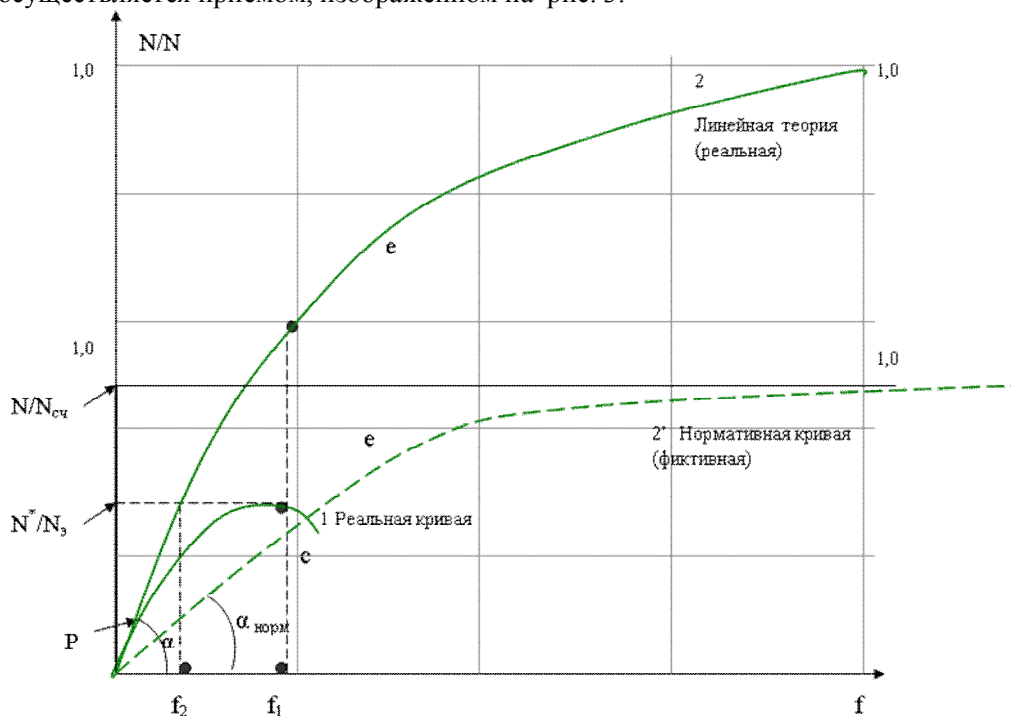


Рис. 3

На этом рисунке кривая 2 соответствует реальной линейной теории сооружений. Кривая 1 соответствует реальной упругопластической модели колонны. На начальных этапах нагружения колонны, кривые 1 и 2 полностью совпадают, имеют общий угол наклона α , рис. 3. В точке P появляются упругопластические деформации

ции, и кривые 1 и 2 расходятся. При значениях продольной силы $N=N^*$, реальная железобетонная колонна достигает предельного равновесия, после которого наступает лавинообразное нарастание прогибов, сопровождающиеся падением силы. Значению продольной силы N^* на кривой 1 соответствует прогиб f_1 . Кривая 2 линейной теории при силе N^* дает меньшее значение прогиба f_2 . Прогиб f_1 больше прогиба f_2 , а на кривой 2 ему соответствует большее теоретическое значение продольной силы $N_y(f_1)$, при прочих тождественных реальных параметрах колонны.

Реальная линейная модель, кривая 2, искусственно наклоняется до фиктивного положения 2', приемом кратного снижения реальной критической силы Эйлера до некоего значения $N_{сч}$ (фиктивная сила Эйлера), при котором фиктивная кривая 2' оказывается проходящей через предельную точку (N^*, f_1) реальной кривой 1.

Реальный прогиб f_1 и соответствующая реальная сила N , рис. 1, достигаются приемом фиктивной «исправленной» кривой Эйлера, которая оказывается внедренной в середину реальной диаграммы $(ON_T N_T^{\exists} L)$. Правая граница $(N_T^{\exists} L)$ реальной диаграммы $(ON_T N_T^{\exists} L)$ исчезла, ее заменяет новая фиктивная граница $(N_T^{сч} L)$, которая своим наличием в реальном расчете выбрасывает значительную часть $(LN_T^{сч} N_T L)$ первоначальной диаграммы из расчета, чем существенно разрушает принципы Еврокодов и теорию расчета сооружений. В нормативном расчете фиктивная сила Эйлера $N_{сч}$ носит название «условная критическая сила».

Пятая ошибка – использование в обработке экспериментов неверного предположения о подобии кривой $N-L$ и кривой $N_{\exists}-L$, с постоянным значением коэффициента подобия: $N = \kappa N_{\exists}$. Результаты экспериментальных исследований сжатых железобетонных колонн дают реальную информацию для отдельных точек диаграммы $(ON_T N_T^{\exists} L)$, в виде набора трех предельных величин – длины L , эксцентриситета e , продольной силы N .

Совокупность пластического шарнира и линейного прогиба определяют теоретический результат в виде $M_{ин}(N) = eN / \left(1 - \frac{N}{N_{\exists}}\right)$, откуда находим величину критической силы Эйлера $N_{\exists} = \frac{\pi^2 D}{L^2} = \frac{NM_{ин}(N)}{M_{ин}(N) - eN}$. Эта зависимость показывает, что жест-

кость D является функцией трех экспериментальных величин – e, L, N . С целью упрощений, в нормах вводится ошибочное предположение о подобии предельных кривых $N-L$ и $N_{\exists}-L$ с некоторым коэффициентом, имеющим постоянное значение для всех длин. Такое предположение является, очевидно, ошибочным, для всего интервала длин L диаграммы $(ON_T N_T^{\exists} L)$. Постоянное соотношение $k = N/N_{\exists}$, делает выражение для N_{\exists} зависящим только от эксцентриситета e

$$N_{\exists} = \frac{kN_{\exists} M_{ин}(kN_{\exists})}{M_{ин}(kN_{\exists}) - ekN_{\exists}},$$

откуда путем элементарных преобразований выводится формула для «условной критической силы», соответственно - «условной жесткости» в формуле Эйлера, оказавшиеся зависящими только от эксцентриситета. Описанный прием, ошибочно устраняет важный учет влияния экспериментального значения силы N на структуру

параметра D . Используемый прием осреднения, свидетельствует о низкой экономической эффективности расчетов по нормативной методике.

Шестая ошибка – необоснованная экстраполяция локальных результатов экспериментов, дополненная ошибочными предположениями, связанными с ползучестью колонн. Существует много различных диаграмм ($ON_T N_T^3 L$), особенности которых невозможно выявить ограниченным числом экспериментальных данных, полученных до сего времени. Особенности этих диаграмм можно выявить только теоретическим путем, пройденным с помощью моделей Еврокодов.

Частные диаграммы ($ON_T N_T^O L$) существенно отличаются друг от друга не только своими границами, но и характером поведения кривых предельных состояний внутри диаграмм. Например, сильно различается поведение кривых, соответствующих обычным и высокопрочным составляющим железобетона. Другой пример. Известно, что при всех тождественных параметрах колонн, колонны прямоугольного сечения дают завышение относительных предельных сил N/N_T до 45%, по сравнению с колоннами других поперечных сечений. Соответственно, существенное влияние оказывает схема расположения арматуры. Кратное снижение несущей способности колонн для учета явления ползучести, содержащиеся в нормах, не имеет никакого экспериментального и теоретического обоснования, о чем свидетельствуют авторы экспериментов Таль К.Э. и Чистяков Е.А.

В 1977 году Таль К.Э., один из основателей нормативного метода, резко критиковал теорию, заложенную в нормативный метод, разработанную еще восемьдесят лет назад и сохранившую свои ошибки до сих пор. Он указывал, что нормативная теория приводит «к потере физического смысла, а, следовательно, к механическому ... применению на практике с вытекающими из этого отрицательными последствиями».

Седьмая ошибка – отсутствие экономичности и надежности получаемых результатов. Еще в 1934 году А.А.Гвоздев сформулировал, что «задача проектирования заключается в разыскании наиболее экономичного решения, допускающего достаточно быстрое возведение сооружения и обеспечивающего во всех отношениях удовлетворительную его службу... О них часто забывают не только в повседневной работе по проектированию, но и при составлении норм». Этот тезис актуален и по сей день. Использование современных норм для расчета железобетонных конструкций, приводит к неоправданному перерасходу материалов, а также свидетельствует о ненадежности результатов расчета. Описанные выше ошибки стандартов по железобетону, являются таковыми при анализе их на основе правил Еврокодов. Противоречие моделей стандартов и Еврокодов, не позволяет осуществить «гармонизацию» стандартов России по железобетону с правилами Всемирной торговой организации.

MISTAKES OF THE STANDARDS FOR THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE

R. S. Sanzharovsky

The tests of theoretical and experimental models of standards for reinforced concrete have been made. The methods to correct mistakes in the hypotheses of the Eurocode have been defined.

KEY WORDS: Eurocode, the method of marginal equilibrium, the theoretical base of standards.