

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ
КРОТКОВРЕМЕННОМ И ДЛИТЕЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ**

**MODELING OF WORK OF STEEL AND CONCRETE ELEMENTS WITH
SHORT AND LONG LOAD**

канд. техн. наук. Лобяк А.В., канд. техн. наук. Орел Е.Ф.

Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (г. Харьков)

A.V. Lobiak, PhD (Tech.), Ye.F. Orel, PhD (Tech.),

Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)

На сегодняшний день существует множество аналитических методик расчета сжатых трубобетонных элементов при кратковременных нагрузках, которые дают достаточно близкие значения несущей способности сжатого трубобетонного элемента. Для сталебетона применимы и общий подход к расчету железобетонных конструкций с жестким или косвенным армированием, и способы приведения бетона к стали с последующим расчетом сталебетона как стальной конструкции, численные методы расчета на основе нелинейной деформационной модели, а также подходы, рекомендуемые Eurocode 4. Также существуют теоретические способы учета реологических свойств бетонного ядра, которые как правило отличаются сложными вычислениями и немалой погрешностью.

Несмотря на большой выбор методов определения несущей способности сжатого трубобетонного элемента, незавершённым остается вопрос построения полноценной методики расчета напряженно-деформированного состояния при кратковременных и длительных нагрузках с учетом истинной диаграммы деформирования бетонного ядра, работающего в условиях объемного напряженного состояния, контактного взаимодействия между стальной обоймой и сердечником, геометрической нелинейности стальной оболочки, а также в зависимости от перераспределения усилий по плоскости нагружения.

Решение поставленной задачи предлагается выполнять на основе нелинейной модели с учетом особенностей деформирования бетонного ядра и стальной обоймы в условиях неоднородного напряженного состояния. Основная сложность при расчете трубобетона в такой постановке заключается в отсутствии диаграмм для ядра ($\sigma_{сз} - \varepsilon_c$), внешний вид которых будет определяться заранее неизвестной величиной бокового давления стальной обоймы на бетон $\sigma_{сру}$.

Реализация поставленной задачи предполагает применение вычислительного комплекса в качестве основного инструмента компьютерного моделирования. Методика расчета использует шагово-итерационный алгоритм, который условно можно разделить на следующие этапы. На первом этапе по аналитической зависимости, полученной на основании статистической обработки опытных значений, определяется коэффициент бокового давления k . Далее, на основе конечно-элементной модели, выполняется расчет НДС для первого шага нагружения. При первом и каждом последующем шаге осуществляется итера-

ционный процесс определения истинного значения прочности бетонного ядра f_{c3} в соответствии с критерием Н.И. Карпенко $f_{c3} = f_{cc} + k\sigma_{cru}$. На первой итерации первого шага $\sigma_{cru} = 0$ и прочность ядра определяется только прочностью цилиндра осевому сжатию f_{cc} . На второй итерации боковое давление становится известным в первом приближении и прочность сердечника, соответственно, уточняется. Далее итерационный процесс продолжается до удовлетворительной сходимости f_{c3} . Последняя итерация будет определять истинные компоненты НДС первого шага нагружения: главные сжимающие напряжения в бетоне σ_{c3} , поперечные напряжения обжатия σ_{c1} , главные сжимающие напряжения σ_{sx} в обойме, радиальные напряжения σ_{sr} , а также относительные деформации ε_{c3} , ε_{c1} , ε_{sx} , ε_{sr} . На третьем этапе выполняется расчет на второй и последующие шаги нагружения, вплоть до разрушения. При этом принято, что предельное состояние, для случая сжатия с малыми эксцентриситетами, наступает при выполнении одного из условий: $\sigma_{c3} = f_{c3}$; $\varepsilon_{c3} = \varepsilon_{cu}$; $\sigma_{sr} = f_y$.

Реологические свойства бетонного ядра допускается учитывать после завершения итерационного процесса очередного шага нагружения, соответствующего эксплуатационным нагрузкам. При этом, как альтернатива Eurocode 2, предложен способ определения коэффициента ползучести $\varphi(t, t_0)$, основанный на коллоидно-химическом представлении механизма длительного деформирования бетона. В основу теории положено более полное представление о кинетической кривой ползучести, и, соответственно, феноменологические уравнения развития деформаций в зависимости от стадии работы бетонного ядра. При этом выделяется четыре стадии деформирования – сжатия в условно упругой постановке, которая длится в течение долей секунды, стадии быстроснатекающей ползучести, нелинейной и линейной части обычной ползучести, а также стадии долговременной ползучести.

Конечно-элементная модель, реализующая расчет НДС, составлена из двух блоков (обоймы и бетонного сердечника), объединенных в совместную работу при помощи односторонних связей, воспринимающих сжатие и сдвиг. Обойма моделируется с учетом физической и геометрической нелинейности, а физическая нелинейность ядра задается подвижными законами деформирования.

Результаты расчета представлены зависимостями развития напряжений и относительных деформаций в бетонном ядре и стальной обойме, графиками изменения прочности сердечника, а также визуализацией на полях напряжений.

Проверка адекватности предложенной методики расчета выполнена сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований трубобетонных элементов длиной 500 мм, диаметром 102 мм, толщиной стенки обоймы 3 мм, и сердечником с различной призматической прочностью. Установлено, что принятое соотношение D/t позволяет повысить прочность бетонного ядра в 2.39-2.67 раза. Полученные результаты подтверждаются удовлетворительной сходимостью с данными собственных и зарубежных экспериментальных исследований. Средняя погрешность для относительных деформаций в ядре и обойме составляет 10.5 %. Средняя погрешность для несущей способности трубобетонных элементов составляет 2.46 %.