

**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  $\sigma_{c3}$ , поперечные напряжения обжатия  $\sigma_{c1}$ , главные сжимающие напряжения  $\sigma_{sx}$  в обойме, радиальные напряжения  $\sigma_{sr}$ , а также относительные деформации  $\varepsilon_{c3}$ ,  $\varepsilon_{c1}$ ,  $\varepsilon_{sx}$ ,  $\varepsilon_{sr}$ . 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 быстронатекающей 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 призменной 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 %.