



УДК 624.014.27

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСИЛЕНИЯ СТОЕК НАПРЯГАЮЩИМ БЕТОНОМ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ Т-ОБРАЗНЫХ УЗЛОВ

Лебедь В.А.

Брестский государственный технический университет

История трубобетона насчитывает около ста лет. В этот период, благодаря интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям, трубобетон находит широкое применение как в строительстве (мосты, фермы, арки, колонны, стойки каркасов, опоры ЛЭП), так в машиностроении. Экспериментальные и теоретические исследования трубобетона, эксплуатация конструкций и сооружений с элементами, выполненными в трубобетоне, позволили в настоящее время использовать достоинства и выявить недостатки данного материала.

Наблюдающиеся в трубобетонных элементах улучшенные физические характеристики возникли в результате благоприятного взаимного влияния железобетонного ядра и стальной оболочки. При проведении экспериментальных исследований отмечалось возникновение сложного взаимодействия между ядром и оболочкой. Данное явление возникает ввиду сдерживания стальной оболочкой трубы чрезмерных деформаций бетонного ядра, возникает так называемый «эффект обоймы» [1]. Бетон при этом находится в трехосном напряженном состоянии, это и приводит к существенному увеличению прочностных характеристик для трубобетонного элемента по от-

ношению к испытанным отдельно поллой трубе и бетонному ядру (наибольший эффект достигается при осевом нагружении трубобетонного элемента). Следует отметить также благоприятное изменение работы бетона на растяжение в замкнутой полости стальной оболочки, данный факт был отмечен в работе Михайлова В.В. [2].

К достоинствам трубобетонных элементов, прежде всего, относят высокую прочность, вследствие работы бетонного ядра в условиях трёхосного напряженного состояния, повышенную жёсткость, пластичность в предельном состоянии, равноустойчивость, повышение местной устойчивости стенок труб, а также эстетичность, коррозионную стойкость, огнестойкость.

Говоря о недостатках, прежде всего, следует сделать упор на надёжность совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра. В процессе работы трубобетонных элементов, вследствие разницы коэффициента Пуассона стали $\nu_T = 0.33$ и коэффициента Пуассона бетона $\approx 0.15-0.2$, труба стремится расширяться под действием осевых напряжений в большей степени, чем ядро. Поскольку прочность прилипания бетонного ядра к оболочке менее прочности бетона на растяжение, происходит отрыв бетонного ядра от металлической оболочки [1]. Кроме того, эксплуатация конструкций с трубобетонными элементами показала, что совместность работы бетонного ядра и стальной оболочки может нарушаться вследствие реологических явлений протекающих в бетоне [3]. Помимо названных недостатков отмечается необходимость защиты наружной поверхности трубы от коррозии, возможность расслоения бетонной смеси при заполнении труб небольшого диаметра, повышенная стоимость труб, сложность стыковки трубобетонных элементов в узлах. Отмеченные недостатки требуют новых технологических и инженерных решений, позволивших снизить их влияние или устранить полностью.

Для предотвращения отставания стальной оболочки от бетонного ядра на ранних этапах работы, авторами [4], [5] было предложено заполнять полости стальных труб бетонами на напрягающих цементах, увеличивая надёжность работы элементов конструкций выполненных в трубобетоне. Экспериментальные изыскания и теоретические исследования данной проблемы отсутствуют, в подобном амплуа бетоны на напрягающих цементах выступают впервые. Известен лишь опыт американских ученых, предложивших применять бетоны на напрягающих цементах для тампонирования нефтяных скважин.

Достаточно детально процесс твердения бетона на напрягающих цементах рассмотрен в работах В.В. Тура [6]. Во время твердения бетона на на-

прягающем бетоне в стесненных условиях с увеличением объема активного этtringита при гидратации, в начальный период происходит образование микротрещин и разуплотнения структуры, которые в дальнейшем исчезают, «самозалечиваются». В итоге при расширении бетона в замкнутой полости отмечается увеличение плотности структуры бетона, а следовательно и его прочности. Силы расширения в бетонном ядре, ввиду их зависимости от высвобождающейся энергии химической реакции, могут достигать значительных величин. Тем не менее, давление бетона при его твердении зависит от прочности его структуры на смятие.

Однако, не смотря на существующие экспериментально-теоретические разработки и ведущиеся интенсивные исследования в этой области, имеются достаточно много неразрешенных вопросов. При заполнении напрягающим бетоном полости трубы его твердение происходит практически в герметично закрытом пространстве, без оттока и дополнительной подачи влаги. Поскольку в нормальных условиях технологически предусмотрено дополнительное увлажнение твердеющего массива, то возникает вопрос в достаточности изначально содержащейся влаги в бетоне для гидратации как силикатных материалов самого вяжущего, так и расширяющегося компонента. Кроме того контроль и прогноз преднапряжения в подобных условиях. Должно быть оценено снижение преднапряжения в результате реологических явлений протекающих в бетоне на протяжении всего периода его твердения. С этой целью были проведены экспериментальные исследования в лаборатории кафедры строительных конструкций и лаборатории преднапряженных конструкций.

Была испытана серия образцов из 6 прямоугольных и круглых труб заполненных бетонами на напрягающих цементах (рис. 1). Для этого был изготовлен специальный стенд (рис. 2). Твердение бетона в трубе происходило в герметично закрытом пространстве, для этого сверху и снизу трубы крепились герметизирующие заглушки. Для качественного анализа эффекта увлажнения к одному из образцов сверху и снизу был осуществлен дополнительный доступ воды. Исследование напряженно-деформированного состояния стальной оболочки при твердении в ее полости напрягающего бетона в процессе эксперимента проводилось при помощи индикаторов часового типа с чувствительностью 0,001 мм и тензодатчиков с базой 10 мм.

Потери преднапряжения можно косвенно оценить по изменениям в деформациях стенки трубы (рис. 3). Таким образом, из-за реологических явлений протекающих в бетоне потери преднапряжения составили 35% для TP-2 и 12% для TP-3. В количественном отношении, вне зависимости от величин

ны достигнутых деформаций стенок, потери преднапряжения примерно одинаковы для обоих образцов.

Более детальный анализ напряженно-деформированного состояния оболочки и бетонного ядра велся с привлечением численных методов – метода конечных элементов. Стальная оболочка была смоделирована пластинами, бетонное ядро – объемными конечными элементами, граничный слой – пластинами, эмитирующими сцепление стальной обоймы с бетонным ядром. Для вычисления эквивалентных напряжений при оценке напряженно-деформированного состояния материала стальной оболочки принята энергетическая теория Губера-Генки-Мизеса, для бетонного ядра – модифицированная теория Баландина-Гениева. Расчет созданной модели велся с учётом упругопластической работы материалов при помощи программного комплекса «МИРАЖ» [7].

Величины деформаций стенок трубы, полученные экспериментально, сопоставлялись с деформациями, полученными на модели, и производилась оценка уровня внутренних напряжений в бетонном ядре.

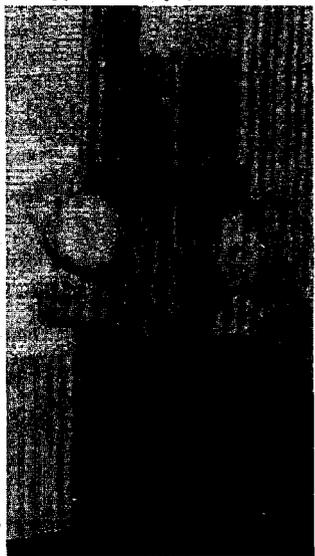


Рис.1 Образец, закрепленный в стенде, во время испытаний.

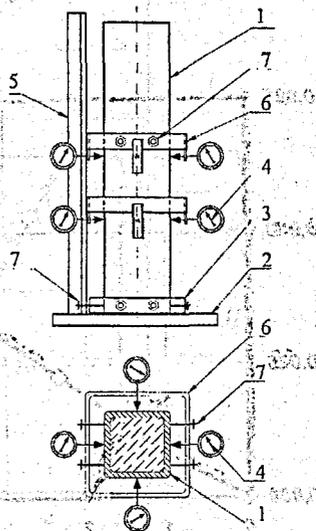


Рис.2. Схема стенда для фиксации перемещений стенок трубы:

- 1 – испытываемый образец; 2 – стальной лист; 3 – индикаторы часового типа; 4 – рамка с креплениями под индикаторы; 5 – уголок; 6 – рамка с креплениями под индикаторы; 7 – крепёжные болты.

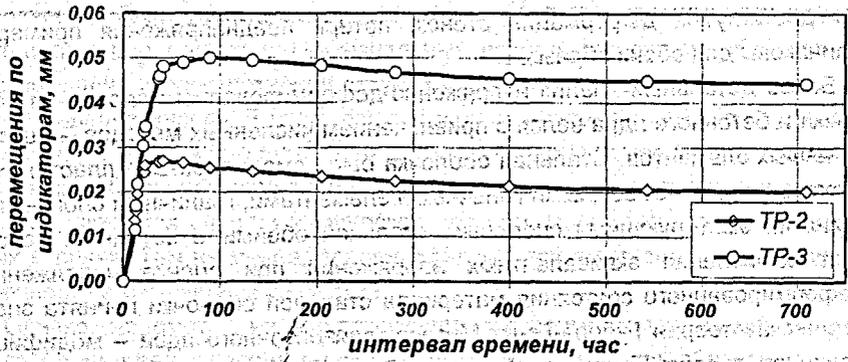


Рис.3. Перемещения стенок труб в образцах TP-2, TP-3:
 TP-2 – при твердении бетона в герметично закрытом пространстве;
 TP-3 – при дополнительном увлажнении бетонного ядра.

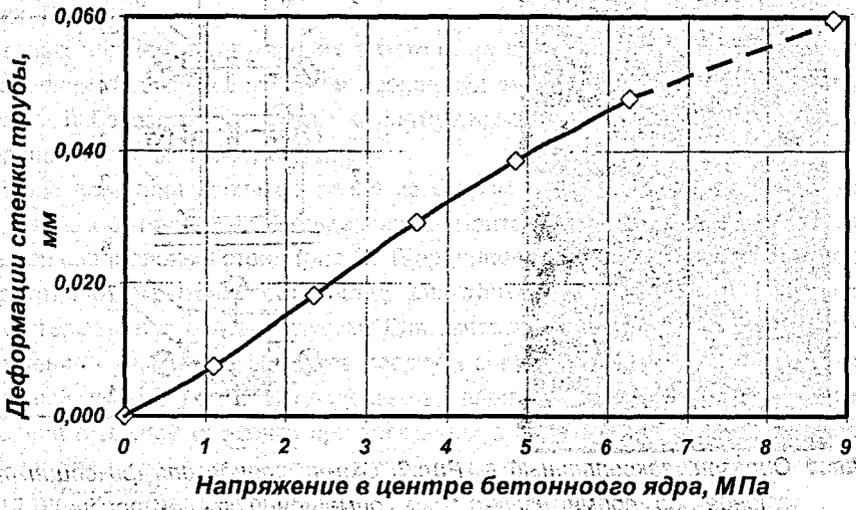


Рис. 4. Зависимость величины деформации стенки трубы в центре грани от достигнутого напряжения в бетонном ядре.

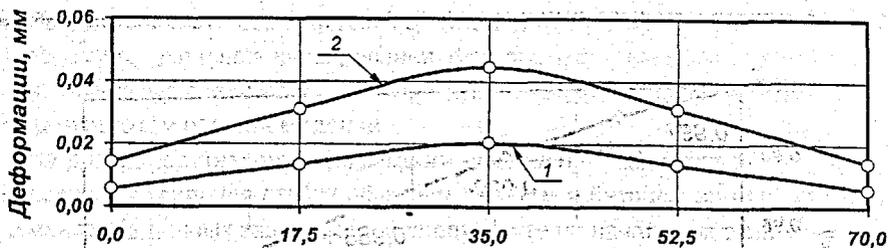


Рис.5. Деформации стенки трубы в сечении нормальном к образующей при уровне напряжений в бетонном ядре: 1 – 2.6 МПа, 2 – 5.7 МПа.

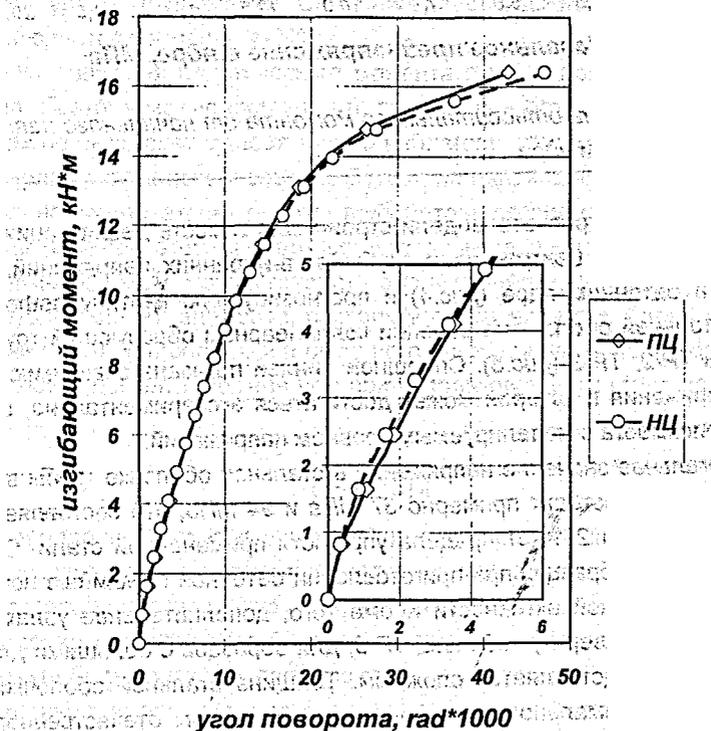


Рис. 6. Зависимость «момент-угол-поворота»: ПЦ – бетон на обычном портландцементе; НЦ – бетон на напрягающем цементе.

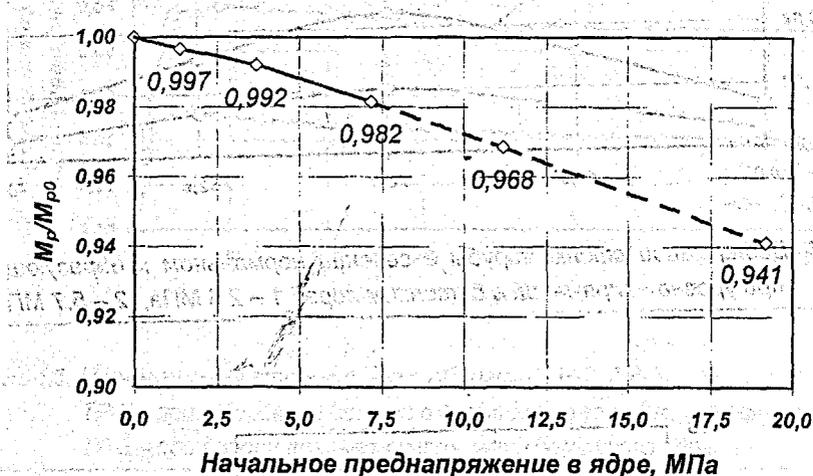


Рис.7. Зависимость относительного момента от начального напряжения в бетонном ядре.

По результатам расчета модели строим зависимость деформации стенки стальной трубы в центре грани трубы от внутренних напряжений, действующих в бетонном ядре (рис.4) и прогнозируемую картину деформаций стенки стальной оболочки в сечении коллинеарном образующей трубы для образцов *TP-2*, *TP-3* (рис.5). Сплошной линией показана зависимость, уровень напряжения в которой может достигаться экспериментально, штриховой – зависимость с моделируемым уровнем напряжений.

Максимальное значение напряжений в стальной оболочке трубы в образцах *TP-2*, *TP-3* составят примерно 37 МПа и 94 МПа, что составляет соответственно 11% и 28% от предела упругости примененной стали. Следует отметить, что в образцах при приготовлении бетонной смеси был использован цемент высокой активности. Кроме того, дополнительное увлажнение, которому был подвергнут образец *TP-3*, для образцов с большими длинами осуществить представляется сложным. Толщина стальной оболочки в образцах 3 мм, минимально возможная для выпускаемого отечественного проката для строительной индустрии. Таким образом, исходя из результатов расчета модели, достигаемый уровень напряжений в оболочке при твердении в ее полости бетона на напрягающем цементе не является критическим.

Представляется необходимым оценить изменение прочности и жесткости Т-образного узла при варьировании фактором внутреннего преднапряжения, используя средства численных методов. Данные зависимости выводим по результатам расчета моделей.

На рис.6 представлены зависимости «момент – угол поворота» с моделированием усиления стойки обычным бетоном и бетоном на напрягающем цементе. Из данных зависимостей следует, что на начальных этапах работы узла усиление стоек бетонами на напрягающих цементах ведет к незначительному повышению жесткости, порядка 2-3%. Однако одновременно применение бетонов на напрягающих цементах сказывается неблагоприятно на работе узла, понижая пластический момент (рис.7). На рис.7 сплошной линией показана зависимость, в которой уровень напряжения может быть достигнут экспериментально, штриховая линия свидетельствует лишь о моделируемом уровне напряжений. Снижение пластического момента на моделях наблюдается примерно 1-2%.

Эффект снижения пластического момента в узле, полученный на моделях, мал. Поэтому можно считать, что применение бетонов на напрягающих цементах не оказывает существенного неблагоприятного влияния на работу узла. Наряду с этим использование бетона на напрягающем цементе позволяет уже на ранних этапах работы труботонного элемента задействовать бетонное ядро, об этом свидетельствует повышение начальной жесткости узла. Таким образом, можно говорить о повышении надежности работы самого труботонного элемента, поскольку обеспечивается более надежное сцепление стальной оболочки и бетонного ядра при применении бетонов на напрягающем цементе, нежели чем при использовании бетонов на обычных цементах.

ВЫВОДЫ

1. При твердении бетона в замкнутой полости расширяющийся компонент не прогидратировал полностью, потенциал по самоуплотнению системы не исчерпан (по отношению к твердению бетона в нормальных условиях).
2. Твердение напрягающего бетона в замкнутой полости трубы позволяет получить более плотную, прочную структуру бетона.
3. Реологические явления, протекающие в бетоне при его твердении в герметично закрытой полости трубы, не исчерпывают первоначально достигнутое преднапряжение.

4. Благодаря эффекту предварительного напряжения обеспечивается надежное сцепление бетонного ядра со стальной оболочкой трубы, тем самым повышается надежность работы самих трубобетонных элементов.
5. Достижимый уровень напряжений в оболочке при твердении в ее полости бетона на напрягающем цементе не является критическим.
6. Применение бетонов на напрягающих цементах не оказывает существенного неблагоприятного влияния на работу узлов, при усилении стоек напрягающими бетонами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукша Л.К. Прочность трубобетона. — Мн.: «Высшая школа», 1977. — 95с.
2. Михайлов В.В. Растяжимость бетона в условиях свободных и связанных деформациях. — Отдельный оттиск из «Трудов» совещания по теории технологии бетонов. Ереван: Изд. АН Армянской ССР, 1956. — 121 с.
3. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. — М.: Стройиздат, 1974. — 144с.
4. Мухин А.В., Зинкевич И.И. Усиление бетонами на напрягающих цементах конструкций из прямоугольных стальных труб. — Теория и практика металлических конструкций: Международная конференция. Сборник трудов, т2, Донецк — Макеевка — 1997. - 178с.
5. Лебедь В.А. К проблеме усиления труб бетоном на напрягающем цементе. — Могилёв: Материалы международной научно-технической конференции. «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка». Могилёвский машиностроительный институт. — 2000. — С. 331.
6. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. - Брест: Изд. БПИ, 1998. - 246 с.
7. Городетский А.С., Евзеров И.Д. и др. Руководство пользователя. Программный комплекс «Мираж» расчет конструкций на прочность. Киев 1994. НИИАСС Научно-исследовательский институт автоматизированных систем в строительстве Госкомградостроительства Украины.